

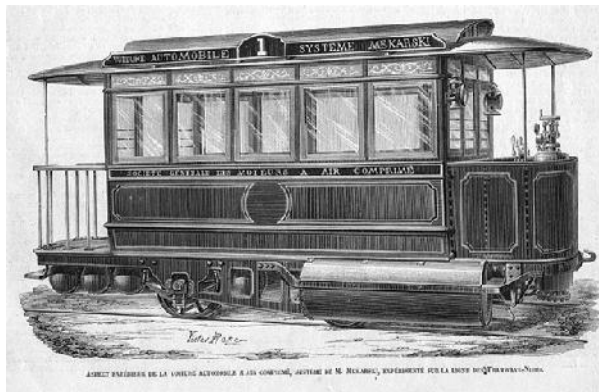
# Economie d'Énergie sur les installations d'Air comprimé

## NOTIONS DE BASE



## INTRODUCTION

L'air comprimé est très utilisé dans le secteur industriel. Il permet le fonctionnement de nombreux systèmes et matériels comme les vérins, les outils et machines à percussion, les détecteurs, les machines de sablage, de revêtement, etc.



## RAPPEL DES UNITES

TABLE 1 - CONVERSION DES UNITES DE MESURE

	Système CG et technique	Multiplier par	Système international	Multiplier par	Système anglais
Longueur	m	1	m	0,0254	in (pouce)
			m	0,3048	ft (pied)
Temps	s	1	s	1	s
Surface	m <sup>2</sup>	1	m <sup>2</sup>	0,000645	in <sup>2</sup>
			m <sup>2</sup>	0,0929	ft <sup>2</sup>
Volume	m <sup>3</sup>	1	m <sup>3</sup>	16,39·10 <sup>-4</sup>	in <sup>3</sup>
			m <sup>3</sup>	0,02832	ft <sup>3</sup>
Vitesse	m·s <sup>-1</sup>	1	m·s <sup>-1</sup>	0,3048	ft·s <sup>-1</sup>
Accélération	m·s <sup>-2</sup>	1	m·s <sup>-2</sup>	0,3048	ft·s <sup>-2</sup>
Poids	kg·s <sup>-2</sup> ·m <sup>-1</sup>	9,81	kg	0,4536	lb (livre)
			kg	14,594	slug = lb·f <sup>-1</sup> ·s <sup>2</sup> ·ft <sup>-1</sup>
Force	kg ou kp	9,81	N	4,4483	lb f (livre)
	kg	0,981	da N = 10 N		
Couple	kg·m	9,81	N·m	1,356	lb f·ft
Densité	kg·m <sup>-3</sup>	9,81	kg·m <sup>-3</sup>	16,02	lb·ft <sup>-3</sup>
Poids spécifique	kg·m <sup>-3</sup>	9,81	N·m <sup>-3</sup>	157,16	lb·ft <sup>-3</sup>
Energie, travail	kg·m	9,81	J	1,356	lb·ft
			KWh=3,6·10 <sup>6</sup> J		
Chaleur	Cal	4186	J	1055,1	BTU
Puissance	kg·m·s <sup>-1</sup>	9,81	W	1,3558	lb·ft·s <sup>-1</sup>
	CV	735	W	745,7	HP
Pression	kg·m <sup>-2</sup>	9,81	Pu	6,8948·10 <sup>2</sup>	p.s.i.=lb·f·in <sup>-2</sup>
	kg·cm <sup>-2</sup>	9,81·10 <sup>4</sup>	Pu		
	kg·cm <sup>-2</sup>	0,981	bar = 10 <sup>5</sup> Pa		
Débit massique	kg·m <sup>-3</sup>	9,81	kg·s <sup>-1</sup>	0,4536	lb·s <sup>-1</sup>
Débit volumique	m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup>	1	m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup>	0,02832	ft <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup>
	Nl·min <sup>-1</sup>	0,000167	Nm <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup>	0,000472	scfm
Viscosité dynamique	kg·m <sup>-1</sup> ·s <sup>-1</sup>	9,81	Pa·s	6,896	lb·f·s·in <sup>-2</sup>
	Po (poise-système CGS)	0,1	Pa·s		
Viscosité cinématique	m <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup>	1	m <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup>	0,0929	ft <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup>
	St (stokes-système CGS)	10 <sup>-4</sup>	m <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup>		
	Système CGS et technique	Diviser par	Système international	Diviser par	Système anglais



TABLE 4 - FACTEURS DE CONVERSION DES UNITES DE PRESSION

A partir des unités indiquées dans la colonne de gauche, multiplier par le coefficient du tableau pour obtenir la nouvelle unité indiquée sur la première ligne du tableau.

Unités	Pa	kPa	MPa	bar	mbar	kp/cm <sup>2</sup>	cm H <sub>2</sub> O	mm H <sub>2</sub> O	mm Hg	p.s.i.
Pa	1	10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-2</sup>	10,1972·10 <sup>-4</sup>	10,1972·10 <sup>-3</sup>	101,972·10 <sup>-3</sup>	7,50062·10 <sup>-2</sup>	0,145038·10 <sup>-3</sup>
kPa	10 <sup>3</sup>	1	10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-2</sup>	10	10,1972·10 <sup>-3</sup>	10,1972	101,972	7,50062	0,145038
MPa	10 <sup>6</sup>	10 <sup>3</sup>	1	10	10 <sup>4</sup>	10,1972	10,1972·10 <sup>3</sup>	101,972·10 <sup>3</sup>	7,50062·10 <sup>3</sup>	0,145038·10 <sup>6</sup>
bar	10 <sup>5</sup>	10 <sup>2</sup>	10 <sup>-1</sup>	1	10 <sup>3</sup>	1,01972	1,01972·10 <sup>3</sup>	10,1972·10 <sup>3</sup>	750,062	14,5038
mbar	100	0,1	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-3</sup>	1	1,01972·10 <sup>-3</sup>	1,01972	10,1972	0,750062	14,5038·10 <sup>-3</sup>
kp/cm <sup>2</sup>	98,0665	98,0665	98,0665·10 <sup>-3</sup>	0,980665	980,665	1	1000	10,000	735,559	14,2233
cm H <sub>2</sub> O	98,0665	98,0665·10 <sup>-3</sup>	98,0665·10 <sup>-6</sup>	0,980665·10 <sup>-3</sup>	0,980665	10 <sup>-3</sup>	1	10	0,735559	14,2233·10 <sup>-3</sup>
mm H <sub>2</sub> O	9,80665	9,80665·10 <sup>-3</sup>	9,80665·10 <sup>-6</sup>	9,80665·10 <sup>-5</sup>	98,0665·10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-4</sup>	0,1	1	73,5559·10 <sup>-3</sup>	14,2233·10 <sup>-3</sup>
mm Hg	133,322	133,322·10 <sup>-3</sup>	133,322·10 <sup>-6</sup>	1,33322·10 <sup>-3</sup>	1,33322	1,35951·10 <sup>-3</sup>	1,35951	13,5951	1	19,3368·10 <sup>-3</sup>
p.s.i.	6,89476	6,89476	6,89476·10 <sup>-3</sup>	68,9476·10 <sup>-3</sup>	68,9476	70,307·10 <sup>-3</sup>	70,307	703,07	51,7149	1

TABLE 7 - FACTEURS DE CONVERSION DES UNITES DE DEBIT

A partir des unités indiquées dans la colonne de gauche, multiplier par le coefficient du tableau pour obtenir la nouvelle unité indiquée sur la première ligne du tableau.

Unité	m <sup>3</sup> /s	l/s	cm <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup> /h	m <sup>3</sup> /min	l/h	l/min	ft <sup>3</sup> /min (scfm)	gallon/min UK	gallon/min USA
m <sup>3</sup> /s	1	10 <sup>3</sup>	10 <sup>6</sup>	3600	60	3,6·10 <sup>3</sup>	60·10 <sup>3</sup>	2,1188·10 <sup>3</sup>	13,198·10 <sup>3</sup>	15,850·10 <sup>3</sup>
l/s	10 <sup>-3</sup>	1	10 <sup>3</sup>	3,6	60·10 <sup>-3</sup>	3,6·10 <sup>3</sup>	60	2,1188	13,198	15,850
cm <sup>3</sup> /s	10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-3</sup>	1	3,600·10 <sup>-6</sup>	60·10 <sup>-6</sup>	3,6	60·10 <sup>-3</sup>	2,1188·10 <sup>-3</sup>	13,198·10 <sup>-3</sup>	15,850·10 <sup>-3</sup>
m <sup>3</sup> /h	0,277778·10 <sup>-3</sup>	0,27778	0,277778·10 <sup>3</sup>	1	16,667·10 <sup>-3</sup>	10 <sup>3</sup>	16,667	0,58856	3,6661	4,4028
m <sup>3</sup> /min	16,667·10 <sup>-3</sup>	16,667	16,667·10 <sup>3</sup>	60	1	6·10 <sup>4</sup>	10 <sup>3</sup>	35,313	219,97	264,17 <sup>-3</sup>
l/h	0,27778·10 <sup>-6</sup>	0,27778·10 <sup>-3</sup>	0,27778	10 <sup>-3</sup>	16,667·10 <sup>-6</sup>	1	16,667·10 <sup>-3</sup>	0,58856·10 <sup>-3</sup>	3,6661·10 <sup>-3</sup>	4,4028·10 <sup>-3</sup>
l/min	16,667·10 <sup>-6</sup>	16,667·10 <sup>-3</sup>	16,667 <sup>-6</sup>	60·10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-3</sup>	60 <sup>-3</sup>	1	35,313·10 <sup>-3</sup>	219,97·10 <sup>-3</sup>	264,17·10 <sup>-3</sup>
ft <sup>3</sup> /min	0,47195·10 <sup>-3</sup>	0,47195	0,47195·10 <sup>3</sup>	1,6990	28,317·10 <sup>-3</sup>	1,6990·10 <sup>3</sup>	28,317	1	6,2288	7,4804
gallon m. UK	75,768·10 <sup>-6</sup>	75,768 <sup>-3</sup>	75,768	0,27276	4,5461·10 <sup>-3</sup>	272,76	4,5461	0,16054	1	1,2009
gallon m. USA	63,090·10 <sup>-6</sup>	63,090·10 <sup>-3</sup>	63,090	0,22712	3,7854·10 <sup>-3</sup>	227,12	3,7854	0,13368	0,83266	1



## LES NOTIONS CLEFS DE L'AIR COMPRIMÉ

**PRESSION** : c'est la première grandeur, fondamentale, qui caractérise l'énergie pneumatique. On la mesure souvent en donnant la différence avec la pression atmosphérique.

**PRESSION absolue** = **PRESSION relative** + **PRESSION atmosphérique**.

L'unité de pression du système international (SI) est le Pascal mais l'unité usuelle en pneumatique est le bar.

$$1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$$

$$1 \text{ bar} = 1 \text{ daN/cm}^2$$

$$1 \text{ Pa} = 10^5 \text{ Pa}$$

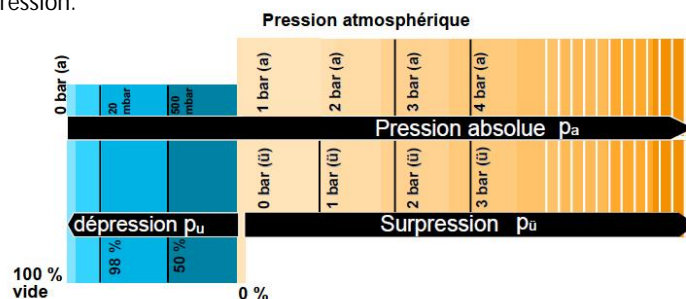


La **pression absolue** ( $p_a$ ) est celle donnée par rapport au point de pression nulle.

Elle est nécessaire à toute considération théorique tant dans les techniques du vide et d'aspiration que dans celles de soufflerie et de ventilation.

La **pression relative** (la **surpression**) est la grandeur déterminée par la mesure et est définie par rapport à la pression atmosphérique.

En pratique on parle en général de surpression, car les appareils de mesure indiquent la surpression.



**Température** : Exprimée en degré Celsius (°C). Les degrés Kelvin ( $0^{\circ}\text{C} = 273,15\text{ K}$ ) servent aux calculs.



**Débit réel** : c'est le débit ramené aux conditions d'aspiration du compresseur à la température et à la pression de l'ambiance.

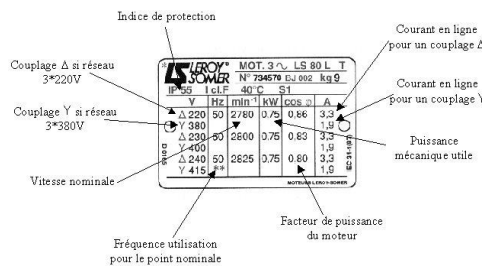


**Normaux mètres cubes (Nm<sup>3</sup>)** : Le volume d'une certaine quantité de gaz est exprimé en m<sup>3</sup>. il dépend de la température, de la pression absolue et de la teneur en humidité de ce gaz.

Pour le cas d'un mètre cube normal Nm<sup>3</sup>, on considère que le gaz se trouve sous pression 1,01325 bar, à une température de 0°C et à l'état sec (HR=0%).

Le débit sera exprimé en Nm<sup>3</sup>/h.

**Puissance normale ou puissance plaquée (kW)** : c'est l'indication de la puissance utile, nominale et caractéristique, indiquée notamment sur la plaque signalétique du moteur.



**Puissance absorbée sur l'arbre (kW)** : c'est la puissance mécanique nécessaire à l'entraînement de l'élément compresseur. ( 1 cv = 0,736 kW).



**Puissance absorbée aux bornes (kW)** : c'est la puissance électrique demandée au réseau d'alimentation électrique. Cette puissance prend en considération le rendement du moteur électrique.

C'est la valeur qui doit être retenue pour exprimer les performances du compresseur.

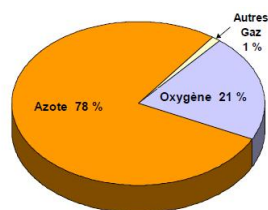
**Cs : Consommation Spécifique (Wh/Nm<sup>3</sup>)**

La consommation spécifique représente l'énergie nécessaire pour fournir le débit réel. Elle doit être exprimée par le rapport entre l'énergie électrique absorbée par le compresseur et le débit d'air réellement délivré après sa bride de sortie.



### Composition d'air :

L'air ambiant à être comprimé à son état sec est composé en volume :



L'air ambiant contient également de l'eau sous forme de vapeur dont la quantité varie fortement en fonction de la température

**Teneur en eau** : la quantité maximale de vapeur d'eau contenue dans l'air est décrite par la pression de vapeur saturante  $P_s$ .

Lorsque la température augmente cette capacité d'absorption augmente également.



## Humidité de l'air

$$\varphi = \frac{h}{h_{\max}} \times 100 \%$$

$\varphi$  = humidité relative [%]  
 $h$  = humidité absolue [g/m<sup>3</sup>]  
 $h_{\max}$  = humidité maximale [g/m<sup>3</sup>]

### Humidité maximale $h_{\max}$ [g/m<sup>3</sup>]

L'humidité maximale  $h_{\max}$  (volume de saturation) représente la quantité maximale de vapeur d'eau contenue dans 1 m<sup>3</sup> d'air à une certaine température.

### Humidité absolue $h$ [g/m<sup>3</sup>]

L'humidité absolue  $h$  représente la quantité de vapeur d'eau réellement contenue dans 1m<sup>3</sup> d'air.

### Humidité relative $\varphi$ [%]

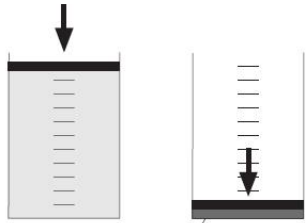
L'humidité relative de l'air représente le rapport entre l'humidité absolue et l'humidité maximale

## Teneur en eau de l'air

Pt. de rosée	Humid. maxima	Pt. de rosée	Humid. maxima	Pt. de rosée	Humid. maxima	Pt. de rosée	Humid. maxima	Pt. de rosée	Humid. maxima	Pt. de rosée	Humid. maxima	Pt. de rosée	Humid. maxima
[°C]	[g/m <sup>3</sup> ]	[°C]	[g/m <sup>3</sup> ]	[°C]	[g/m <sup>3</sup> ]	[°C]	[g/m <sup>3</sup> ]	[°C]	[g/m <sup>3</sup> ]	[°C]	[g/m <sup>3</sup> ]	[°C]	[g/m <sup>3</sup> ]
+100°	588,208	+76°	248,840	+52°	90,247	+28°	26,970	+4°	6,359	-19°	0,960	-43°	0,083
+99°	569,071	+75°	239,351	+51°	86,173	+27°	25,524	+3°	5,953	-20°	0,880	-44°	0,075
+98°	550,375	+74°	230,142	+50°	82,257	+26°	24,143	+2°	5,570	-21°	0,800	-45°	0,067
+97°	532,125	+73°	221,212	+49°	78,491	+25°	22,830	+1°	5,209	-22°	0,730	-46°	0,060
+96°	514,401	+72°	212,648	+48°	74,871	+24°	21,578	0°	4,868	-23°	0,660	-47°	0,054
+95°	497,209	+71°	204,286	+47°	71,395	+23°	20,386	-1°	4,487	-24°	0,600	-48°	0,048
+94°	480,394	+70°	196,213	+46°	68,056	+22°	19,252	-2°	4,135	-25°	0,550	-49°	0,043
+93°	464,119	+69°	188,429	+45°	64,848	+21°	18,191	-3°	3,889	-26°	0,510	-50°	0,038
+92°	448,308	+68°	180,855	+44°	61,772	+20°	17,148	-4°	3,653	-27°	0,460	-51°	0,034
+91°	432,885	+67°	173,575	+43°	58,820	+19°	16,172	-5°	3,428	-28°	0,410	-52°	0,030
+90°	417,935	+66°	166,507	+42°	55,989	+18°	15,246	-6°	3,213	-29°	0,370	-53°	0,027
+89°	403,380	+65°	159,654	+41°	53,274	+17°	14,367	-7°	2,994	-30°	0,330	-54°	0,024
+88°	389,225	+64°	153,103	+40°	50,672	+16°	13,531	-8°	2,751	-31°	0,301	-55°	0,021
+87°	375,471	+63°	146,771	+39°	48,181	+15°	12,739	-9°	2,537	-32°	0,271	-56°	0,019
+86°	362,124	+62°	140,659	+38°	45,593	+14°	11,987	-10°	2,339	-33°	0,244	-57°	0,017
+85°	340,186	+61°	134,684	+37°	43,508	+13°	11,276	-11°	2,156	-34°	0,220	-58°	0,015
+84°	336,660	+60°	129,020	+36°	41,322	+12°	10,600	-12°	1,960	-35°	0,198	-59°	0,013
+83°	324,469	+59°	123,495	+35°	39,286	+11°	9,961	-13°	1,800	-36°	0,178	-60°	0,011
+82°	311,616	+58°	118,199	+34°	37,229	+10°	9,356	-14°	1,650	-37°	0,160	-65°	0,00640
+81°	301,186	+57°	113,130	+33°	35,317	+9°	8,784	-15°	1,510	-38°	0,144	-70°	0,00330
+80°	290,017	+56°	108,200	+32°	33,490	+8°	8,234	-16°	1,380	-39°	0,130	-75°	0,00130
+79°	279,278	+55°	103,453	+31°	31,744	+7°	7,732	-17°	1,270	-40°	0,117	-80°	0,00060
+78°	268,806	+54°	98,883	+30°	30,078	+6°	7,246	-18°	1,150	-41°	0,104	-85°	0,00025
+77°	258,827	+53°	94,483	+29°	28,488	+5°	6,790	-19°	1,050	-42°	0,093	-90°	0,00010

## Quantité de condensat lors de la compression

Exemple :

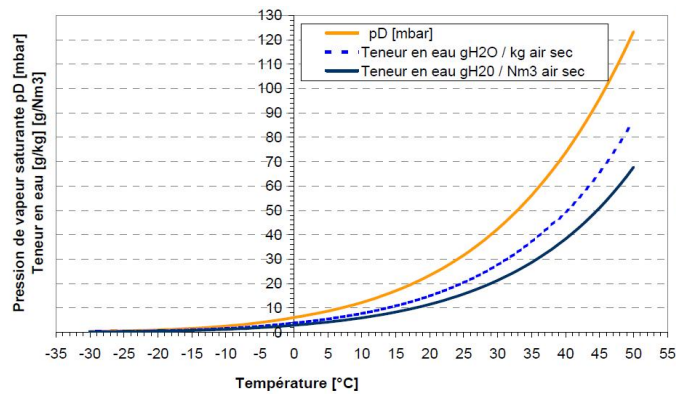


$$\begin{aligned}
 V_1 &= 6,5 \text{ m}^3 & V_2 &= 0,59 \text{ m}^3 \\
 p_1 &= 0 \text{ bar}_s = 1 \text{ bar}_{\text{abs}} & p_2 &= 10 \text{ bar}_s = 11 \text{ bar}_{\text{abs}} \\
 T &= 35^\circ \text{C} & T &= 35^\circ \text{C} \\
 \phi_1 &= 80 \% & \phi_2 &= 100 \% \\
 h_{\text{max}} &= & &= 39,286 \text{ g/m}^3
 \end{aligned}$$

la quantité de condensat  $m_c$  :

$$\begin{aligned}
 m_c &= \frac{V_1 \times h_{\text{max}1} \times j_1}{100} - \frac{V_2 \times h_{\text{max}1} \times j_2}{100} \\
 m_c &= \frac{6,5 \times 39,286 \times 80}{100} - \frac{0,59 \times 39,286 \times 100}{100} \\
 m_c &= \frac{\text{m}^3 \times \text{g} / \text{m}^3 \times \%}{\%} - \frac{\text{m}^3 \times \text{g} / \text{m}^3 \times \%}{\%} \\
 m_c &= 181,108 \text{ g}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 m_c &= \text{formation de condensat} & [\text{g}] \\
 V_1 &= \text{volume pour } 0 \text{ bar}_s & [\text{m}^3] \\
 V_2 &= \text{volume pour } 10 \text{ bar}_s & [\text{m}^3] \\
 h_{\text{max}1} &= \text{humidité maximale à } 35^\circ \text{C} & [\text{g/m}^3] \\
 j_1 &= \text{humidité relative de } V_1 & [\%] \\
 j_2 &= \text{humidité relative de } V_2 & [\%]
 \end{aligned}$$



Soit de l'air avec un taux d'humidité relative de 60% et à une température de 42°C.  
 l'air est comprimé à 7 bar et immédiatement refroidi à 25 °C, il se formera par condensation 30g d'eau par m<sup>3</sup> d'air comprimé.



TABLE 6 - VAPEUR D'EAU SATURÉE CONTENUE DANS L'AIR COMPRIMÉ

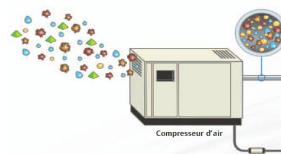
Grammes de vapeur d'eau saturée par mètre cube (g/m³) d'air à la pression atmosphérique 1.013 bar (0 bar manométrique), aux différentes pressions et températures.

Temper. °C	Pression - bar												
	0	0,4	0,63	1	1,6	2,5	4	6,3	8	10	12,5	16	20
0	4,82	3,45	2,97	2,42	1,87	1,39	0,97	0,67	0,54	0,44	0,36	0,29	0,23
5	6,88	4,93	4,24	3,46	2,68	1,99	1,39	0,95	0,77	0,63	0,52	0,41	0,33
10	9,41	6,74	5,80	4,73	3,66	2,72	1,90	1,30	1,06	0,87	0,70	0,56	0,45
15	12,7	9,08	7,83	6,39	4,94	3,67	2,56	1,76	1,43	1,17	0,95	0,76	0,61
20	17,4	12,5	10,7	8,75	6,77	5,02	3,51	2,41	1,95	1,60	1,30	1,04	0,84
25	23,6	16,9	14,6	11,9	9,18	6,82	4,77	3,27	2,65	2,17	1,77	1,40	1,14
30	30,5	21,8	18,8	15,3	11,9	8,81	6,16	4,22	3,43	2,81	2,29	1,81	1,47
35	39	27,9	24	19,6	15,2	11,3	7,87	5,40	4,38	3,59	2,92	2,32	1,88
40	49,6	35,5	30,6	24,9	19,3	14,3	10	6,87	5,57	4,55	3,72	2,95	2,39
45	63,5	45,45	39,2	31,9	24,7	18,3	12,8	8,79	7,13	5,84	4,76	3,77	3,06
50	81	58	49,9	40,7	31,5	23,4	16,4	11,2	9,10	7,45	6,07	4,82	3,90

### Pourquoi purifier l'air ?

L'air pollué peut causer des problèmes ou des dégâts dans le réseau d'air comprimé.

Un air pur garanti le bon fonctionnement des composants connectés, tels les distributeurs et les vérins.



### Qui sont les pollueurs ?

Les pollueurs sont essentiellement :

- les **particules solides** (poussière, suie, produits d'abrasion et de corrosion, ...) que l'on peut classer en fonction de leur taille (grosses > 10 µm, petites de 1 à 10 µm et très fines <1µm) ;
- **l'eau** : lors du refroidissement de l'air comprimé, il se forme une quantité importante de condensation. Si l'air n'est pas asséché, la corrosion s'installe et endommage les composants ;
- **l'huile** : une concentration d'huile peut boucher les parties pneumatiques sensibles et emporter ou endommager les couches grasses de protection.

Une classification de la qualité de l'air comprimé a été établie (norme ISO 8573-1) :

**Qualité de l'air comprimé ISO 8573-1:2001**

Classe de qualité	PARTICULES SOLIDES Nb max. de particules par m <sup>3</sup>			EAU Point de rosée sous pression °C	HUILE ET VAPEUR D'HUILE mg/m <sup>3</sup>	Classe de qualité
	0,1-0,5 micron	0,5-1 micron	1,0-5 microns			
0	Normes spécifiées par l'utilisateur final ou le fabricant et plus strictes que la classe 1					0
1	100	1	0	-70	0.01	1
2	100,000	1000	10	-40	0.1	2
3	Non spécifié	10,000	500	-20	1	3
4	Non spécifié	Non spécifié	1,000	3	5	4
5	Non spécifié	Non spécifié	20,000	7	Non spécifié	5
6	Non spécifié	Non spécifié	Non spécifié	10	Non spécifié	6

Par exemple, les classes très génériques suivantes :

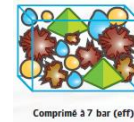
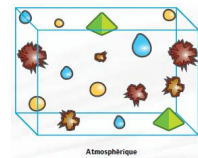
*L'air puissance :*

- Particule : 4, - Eau : 4, - huile : 3

*L'air instrument de contrôle :*

- particule : 4, - eau : 4, - huile : 3

*L'air sur process spécifique, avec des qualités élevées*



**Le besoin de puissance pour la compression**

Pour la description thermodynamique du changement d'état de l'air (Compression/détente/refroidissement) l'air est considéré comme un **GAZ PARFAIT**

$$P \times V = n \times R \times T$$

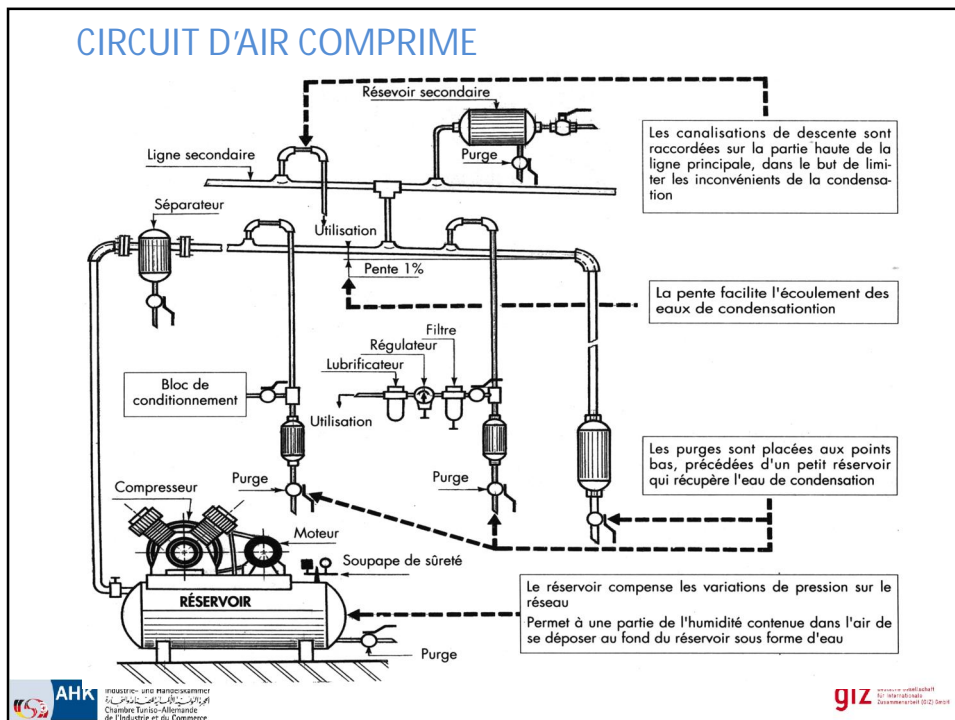
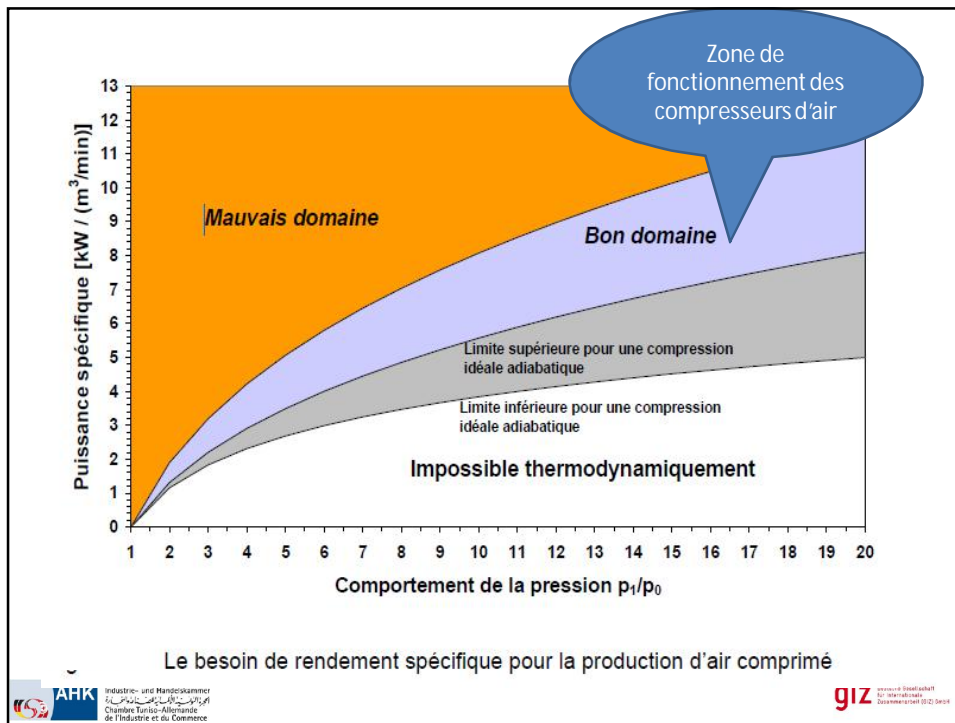
$$R = 8,3144 \text{ J/mol K}$$

Le produit de la pression par le volume est proportionnel à la température.

La compression est considérée Isotherme (variation de la pression à une température constante) et adiabatique (variation de la pression sans ajout et sans apport de chaleur)

$$P_1 \times V_1 = P_2 \times V_2$$





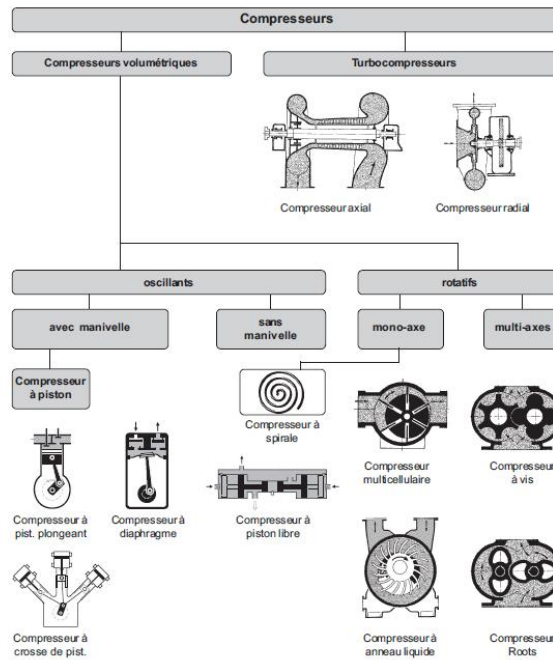
## Le compresseur



Produire de l'air comprimé peut se faire par deux méthodes:

- La compression dynamique (transformation de la vitesse de l'air en pression):  
compresseurs centrifuges et compresseurs axiaux.
- La compression volumétrique (réduction de volume à l'aide d'un élément comprimant):  
compresseur alternatifs (le plus souvent à piston) et rotatifs (compresseurs à vis, à palettes, à engrenages et à anneaux liquides).

## La Famille des compresseurs



### Le réservoir



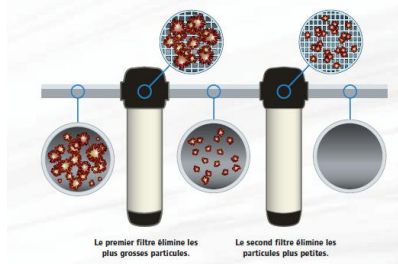
Le réservoir permet d'obtenir momentanément une distribution d'air supérieure au débit délivré par le compresseur, de maintenir une pression quasi constante dans le circuit, de refroidir l'air comprimé et de récupérer le condensat.

### Le sécheur



Le rôle du sécheur est de diminuer la teneur en vapeur d'eau de l'air comprimé. Cette vapeur d'eau, en se condensant peut en effet avoir de graves conséquences sur le réseau et l'outillage. Deux méthodes principales: le séchage par adsorption et

### Les filtres



Les filtres limitent la concentration des particules, de l'huile et de l'eau qui sont véhiculées par l'air comprimé dans le réseau.

### Les purgeurs de condensat



Les purgeurs évacuent les condensats (eau condensée mélangée avec de l'huile,...) générés par la production d'air comprimé.

### Le séparateur



Le séparateur reçoit les condensats en provenance des purges. Sa fonction est de séparer l'eau de l'huile, évitant ainsi tout risque de rejet polluant.

### Le réducteur /régulateur de pression

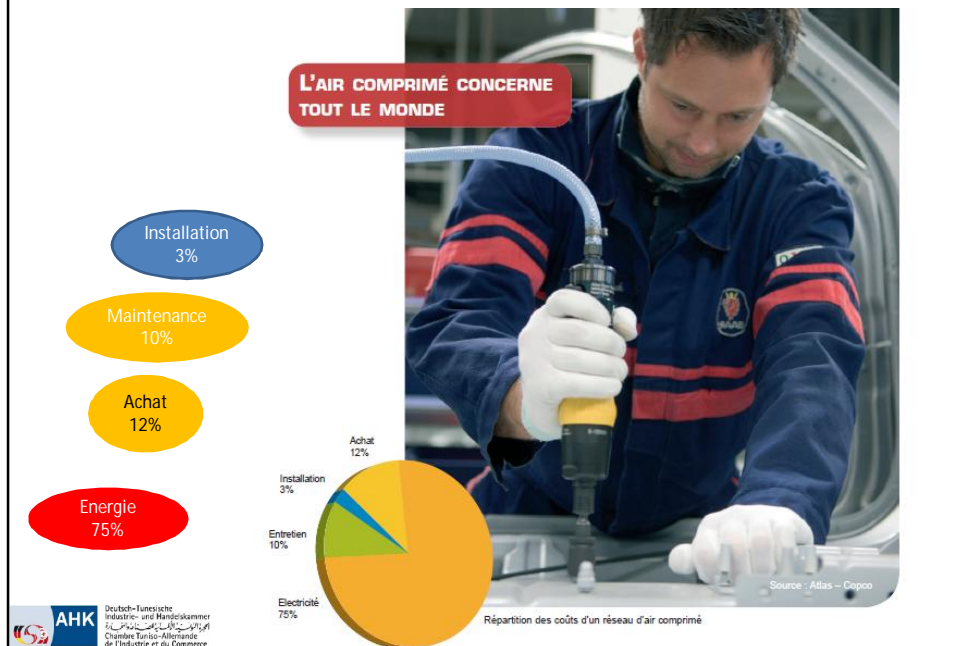


le réducteur de pression est utilisé pour alimenter les installations pneumatiques de mesure, contrôle et régulation en énergie auxiliaire constante

## EXPLOITATION OPTIMALE



## CONSOMMATION ENERGETIQUE



Toute industrie est équipée d'un réseau d'air comprimé :

Pratiquement chaque site industriel a besoin d'air comprimé. Sa consommation d'électricité représente entre **1% et 25%** selon les secteurs.

Le secteur où ce poste pèse le plus sur la facture d'électricité est celui des **fabrications métalliques**.

Dans **l'industrie agroalimentaire**, il représente en moyenne **5%** de la facture mais **peut varier fortement d'une entreprise** à l'autre, selon le type d'activité.

Le rendement des installations d'air comprimé est très souvent **médiocre** ....

Il n'est pas rare de rencontrer des installations dont le rendement se limite à **10%** ou à **15%**.

Les « kWh pneumatiques » coûtent alors jusqu'à **10 fois le prix des kWh électriques !!!**

...mais peut être très facilement amélioré à peu de frais

Il n'est pas rare non plus de pouvoir diminuer les consommations d'électricité d'une installation d'air comprimé de **25% à 30%** voire même parfois jusque **50%**.

Les 8 action d'économies d'énergie sur un réseau d'air comprimé

#### Dans la salle des compresseurs

- 1 Régulation des compresseurs et commande intelligente des compresseurs en cascade
- 2 Récupération de chaleur
- 3 Ventilation du local
- 4 Traitement de l'air adéquat
- 5 Taille de stockage

#### Sur le réseau

- 6 Détection des fuites
- 7 Minimiser les pertes de charge
- 8 Régulation/zonage du réseau



COMMENT PEUT ON LE FAIRE ?!

**AMÉLIORATIONS ENTRAÎNANT  
DES ÉCONOMIES D'ÉNERGIE**

Avez-vous besoin de produire de l'air comprimé à ce niveau de pression ?

→ Vérifiez si vous avez toujours besoin de produire de l'air comprimé à cette pression.

- En général, les machines ne nécessitent que 6 bars.

- Une diminution de la pression de **1 bar** génère quelques **5%** d'économie d'électricité.



Régulateur de pression.

**Action :**

Si votre pression nominale est inutilement élevée, diminuez par paliers, jusqu'à atteindre vos besoins effectifs

Les compresseurs sont-ils arrêtés quand il n'y a pas de demande d'air ?

→ Très souvent, l'installation est maintenue en pression même lorsque l'atelier ne travaille pas.

Si aucune application ne doit impérativement être maintenue en pression, il n'est pas nécessaire de maintenir le réseau en pression. Vu l'existence de fuites, les compresseurs vont consommer de l'électricité tout à fait superflue.

**Action :**

Vérifiez que les compresseurs sont éteints le plus souvent possible (nuits, week end, jours fériés).  
Vérifiez que les réglages de coupure par horloge en tiennent bien compte.

Quel est votre programme de maintenance du traitement d'air ?

- Le manque de maintenance peut vous coûter 15% de la facture d'électricité
- Les filtres à air s'encrassent et induisent des pertes de charge supplémentaires qui coûtent de l'énergie.
  - Les purgeurs peuvent s'obstruer et doivent être régulièrement vérifiés, voire remplacés.
  - Vérifiez également la performance des sècheurs et la propreté des échangeurs de chaleur.

Action :  
Vérifiez les recommandations des constructeurs. Entretenez, nettoyez et remplacez les éléments

## Vidéo : Maintenance d'un comprimé d'air



Le local technique est-il correctement ventilé ?

→ Plus l'air est froid, propre et sec, meilleures seront les performances de votre installation.

Les compresseurs puisent l'air dans le local technique qui les abrite. Cet air est alors chauffé par le compresseur et s'est chargé en humidité et peut-être en gouttelettes d'huile. Il est donc important d'assurer une bonne ventilation du local.

Idéalement, l'air d'aspiration des compresseurs doit être puisé à l'extérieur, au nord et à l'ombre, la prise d'air étant éloignée de toute sortie d'extraction de l'atelier.

Aspirer de l'air extérieur permet d'abaisser en moyenne sa température de 10°C et d'économiser 3,5% d'électricité.

Il suffit parfois de placer une simple gaine flexible pour y arriver.



Avez-vous déjà évalué vos fuites d'air comprimé ?

Répartition des volumes d'air comprimé utilisés en industrie (moyennes internationales)	
Consommation par les équipements	43 %
Fuites dans l'atmosphère	34 %
Utilisations inappropriées	16 %
Air purgé	5 %
Purgeurs automatiques défaillants	2 %

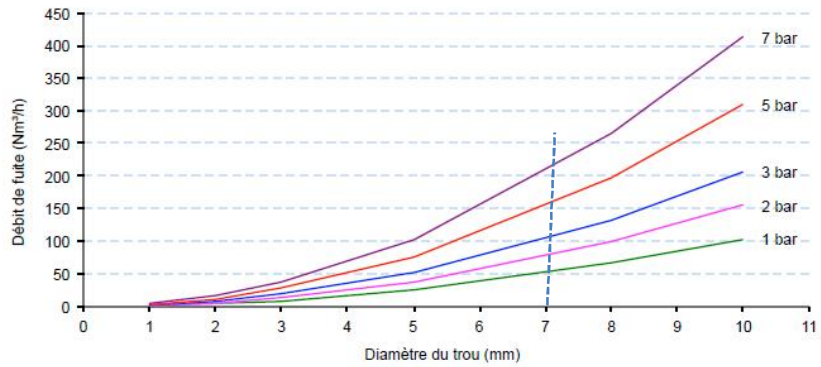
- Profitez d'une période d'inactivité (week-end) pour évaluer l'importance des fuites.
  - o Maintenez les compresseurs en marche pendant une période de temps bien définie.
  - o Relevez les consommations d'électricité avant et après. Si aucune application ne consomme de l'air comprimé, les compresseurs ne tournent que pour **compenser les fuites**.
  - o La plupart des fournisseurs de compresseurs disposent d'un data logger qu'ils peuvent installer chez vous pendant une période d'inactivité pour relever les débits de fuite.
  - o Calculez votre taux de fuite. Un taux normal doit se situer en-dessous de **15%**.

**Action :**

Etablir un programme de chasse aux fuites tous les mois ou tous les 2 mois.  
 Désigner un responsable pour mettre ce plan en œuvre.  
 Ce plan doit prévoir non seulement le repérage des fuites mais aussi les interventions pour colmater ces fuites.

Diamètre (mm) ↓	Débit d'air libre au travers d'un orifice en litres/secondes				
	2 b	3 b	4 b	5 b	6 b
Pression abs ⇒					
0,1	0,0045	0,006	0,0075	0,0090	0,010
0,2	0,018	0,024	0,030	0,036	0,042
0,3	0,040	0,054	0,068	0,081	0,095
0,5	0,114	0,151	0,188	0,225	0,263
1	0,453	0,603	0,753	0,902	1,052
1,5	1,022	1,358	1,7	2,033	2,367
2	1,817	2,417	3,017	3,617	4,2
3	4,083	5,433	6,767	8,117	9,467
4	7,267	9,65	12,05	14,417	16,833
5	11,35	15,083	18,833	22,5	26,333
6	16,35	21,733	27,167	32,5	37,833
8	29,167	38,667	48,167	57,667	67,333
10	45,333	60,333	75,333	90,167	105,167
Pression abs ⇒					
	7 b	8 b	10 b	15 b	20 b
0,1	0,012	0,013	0,016	0,024	0,031
0,2	0,048	0,054	0,066	0,096	0,126
0,3	0,108	0,122	0,149	0,217	0,283
0,5	0,3	0,338	0,413	0,6	0,787
1	1,202	1,352	1,65	2,4	3,133
1,5	2,7	3,05	3,717	5,383	7,083
2	4,8	5,4	6,6	9,583	12,583
3	10,817	12,167	14,85	21,667	28,333
4	19,167	21,667	25,417	38,333	50,333
5	30	33,833	41,333	60	78,667
6	43,333	48,667	59,5	86,333	113,333
8	77	86,5	105,667	153,333	201,667
10	120,167	135,167	155	240	313,333





Evolution du débit de fuite en fonction de la pression et du diamètre du trou

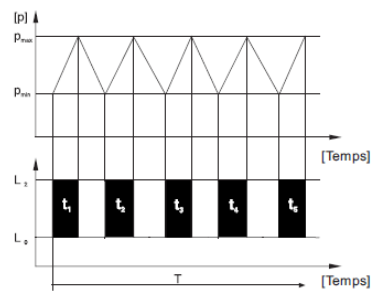
### Détermination des fuites par mesure de la durée de fonctionnement

La formule suivante permet de déterminer approximativement le volume de fuite  $V_F$  :

$$V_F = \frac{D \times \Sigma t \times 1000}{T}$$

$$l/min = \frac{m^3/min \times s \times 1000 l}{s \times m^3}$$

- $V_F$  = Volume de fuite [l/min.]
- $D$  = Débit du compresseur [m³/min.]
- $\Sigma t$  = Durée de fonct. totale du compresseur [s]  
 $\Sigma t = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5$
- $T$  = Durée de la mesure [s]



Exemple :

- Un compresseur d'un débit réel  $D_n$  : 1,65 m<sup>3</sup>/min.
- déclenche cinq démarrages pendant une durée  $T = 180$  secondes.
- La durée de fonctionnement en charge  $\Sigma t$  est de 30 secondes au cours de la durée de mesure  $T$ .

$$V_F = \frac{1,65 \cdot 30 \cdot 1000}{180}$$
$$V_F = 275 \text{ l/min}$$

Le volume de fuite du système d'air comprimé est de **275 l/min** environ soit **16,7%**.

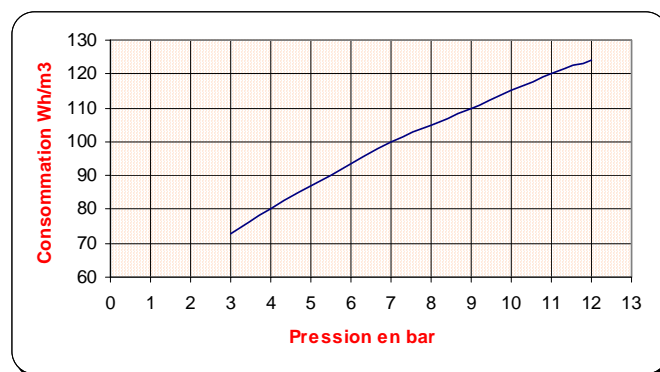
#### Limite des volumes de fuites

On en déduit les volumes de fuites acceptables sur le plan économique suivants :

- max. **5 %** sur les petits réseaux
- max. **7 %** sur les réseaux moyens
- max. **10 %** sur les gros réseaux
- max. **13 - 15 %** sur les très gros réseaux par ex. fonderies, aciéries, chantiers navals, etc.

Dans l'atelier : AMÉLIORATIONS : COUT ZERO

#### Consommation énergétique :



Pour  $P = 7$  bar on consomme 100 Wh/m<sup>3</sup>

Exemple :

Pour fixer un ordre de grandeur, prenons la configuration suivante :

installation composée d'un seul compresseur

caractéristiques du compresseur :

puissance nominale en charge :	90 kW
débit nominal :	842 Nm <sup>3</sup> /h
pression de l'air comprimé :	7 bar
taux de marche annuel :	75 %
taux de charge moyen annuel :	80 %
quantité annuelle d'air produit :	4.426 kNm <sup>3</sup>
	= 842 Nm <sup>3</sup> /h x 0,8 x 8.760 h/an x 0,75
taux de fuite :	10 %
quantité annuelle d'air de fuite :	442,6 kNm <sup>3</sup>
consommation spécifique moyenne du compresseur :	0,112 kWh/Nm <sup>3</sup>

Dans l'atelier : AMÉLIORATIONS : COUT ZERO

MESURES

T1	31	S	t1	36	S
T2	33	S	t2	35	S
T3	34	S	t3	36	S
T4	35	S	t4	33	S
T5	33	S	t5	36	S
T6	34	S	t6	35	S
T	33		t	35	
Q	508	m <sup>3</sup> /h			

Fuite	69	l/s	SOIT	247	m <sup>3</sup> /h	SOIT	48,7	%
-------	----	-----	------	-----	-------------------	------	------	---

FONCTIONNEMENT MINIMAL PAR JOUR :	16	h
CONSOMMATION ENERGETIQUE PAR MESURE SUR 20 min :	21	kWh
CONSOMMATION ENERGETIQUE SUR 16 HEURES :	1008	kWh (TOUT LE CENTRAL DE COMPRESSION)
CONSOMMATION ENERGETIQUE DES FUITES :	491	kWh
COUT D'ENERGIE MOYEN :	0,121	DT
COUT DES FUITES PAR JOUR :	59	DT/J
COUT DES FUITES PAR MOIS :	1187	DT/mois

## Technique de détection des fuites d'air comprimé

### ▪ Méthode auditive

Méthode sans aucun frais. C'est méthode basique qui consiste à localiser les fuites importantes de manière auditive. Elle permet de réduire des pertes non négligeables.



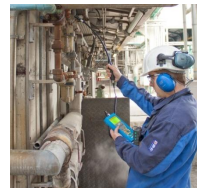
### ▪ Bulles de savon

Méthode spécialement utilisée pour les fuites minuscules qui n'ont aucun sifflement. Elle est trop longue et fastidieuse.



### ▪ Détecteur ultra son

Méthode la plus couteuse. Elle consiste à l'utilisation d'un détecteur ultra son capable de détecter la moindre fuite.



## Dans l'atelier : AMÉLIORATIONS : COUT ZERO

→ Etablissez un programme de repérage des fuites

o Maintenez les compresseurs en marche pendant une période de non utilisation des ateliers.

o Les fuites les plus importantes se repèrent au bruit.

o Les fuites moins importantes se repèrent avec une solution savonnée déposée sur les tuyaux.

o Vérifiez en priorité :

- les raccords et joints (raccords rapides en particulier) ;
- les flexibles ;
- les cylindres et distributeurs ;
- les soufflettes ;
- les purgeurs ;
- les soupapes de sécurité.

Le saviez-vous ?

Un minuscule petit trou de 0,5 mm de diamètre provoque une fuite de 1 m<sup>3</sup>/h.

o Etiquetez ou marquez chaque fuite identifiée ou mieux, réparez instantanément.

o Renouvelez régulièrement les opérations.

Existe-t-il une partie du réseau qui n'est plus utilisée ?

Vérifiez si ces canalisations sont bien déconnectées du réseau ou colmatées.

- o Etablissez un relevé du réseau et identifiez les sections non utilisées.
- o Colmatez ou démontez les jonctions de ces parties non utilisées.

Découragez l'usage des soufflettes

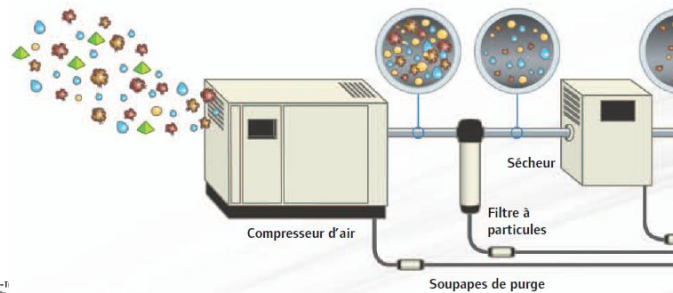
- o L'air comprimé coûte cher.
- o Préférez le balai ou l'aspirateur aux soufflettes pour nettoyer un plan de travail.
- o Ajustez si possible la pression de régulation des soufflettes à 2 bars. Il existe des soufflettes de sécurité bloquées  $\geq 2$  bars.
- o Indiquez clairement sur les soufflettes leur pression maximale, leur pression nominale et leur usage.
- o Recommander l'emploi d'un simple tuyau pour nettoyer les postes de travail.

N'êtes-vous pas trop exigeant en matière de traitement d'air ?

→ Une exigence de qualité d'air excessive coûte cher et provoque souvent des consommations d'électricité inutiles.

Par prudence ou parce qu'il y a quelques temps, une activité de l'atelier nécessitait de l'air particulièrement **propre et sec**, vous avez une fois pour toutes établi des exigences de filtrage, déshuilage et d'humidité de l'air.

Avec le temps, on se rend parfois compte que l'on a été excessivement prudent.



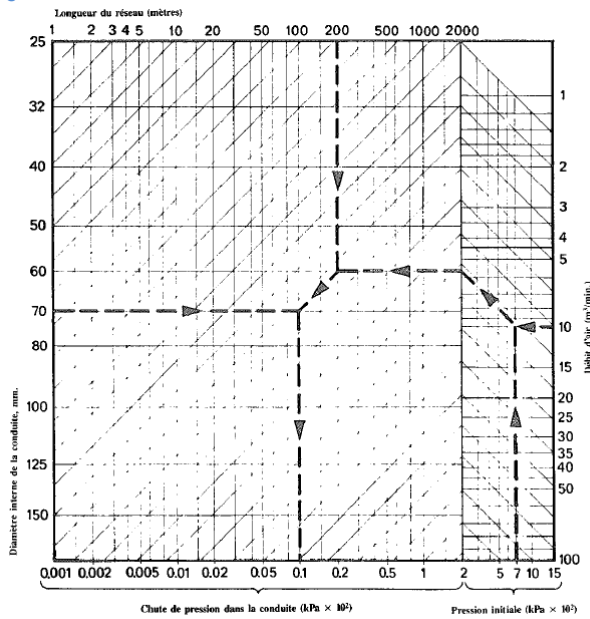
Caractéristiques techniques du filtre :

Débit d'air comprimé traité		200 m <sup>3</sup> /h
Pression de service		7 bar rel
Pression de service maximum		16 bar rel
Température minimum de service		+1 °C
Température maximum de service		+60 °C
Nombre et référence de l'élément filtrant		1/12075P
Perte de charge de l'élément filtrant saturé		0.68 bar
Raccordement entrée/sortie d'air		1 "G
Encombrement :	Largeur	130 mm
	Hauteur	315 mm
Poids		4.3 kg
Construction : enveloppe en aluminium, avec revêtement extérieur en résine synthétique		

Doit-on continuer à utiliser des filtres si performants ? Ils sont chers et présentent des pertes de charge supérieures à la moyenne.

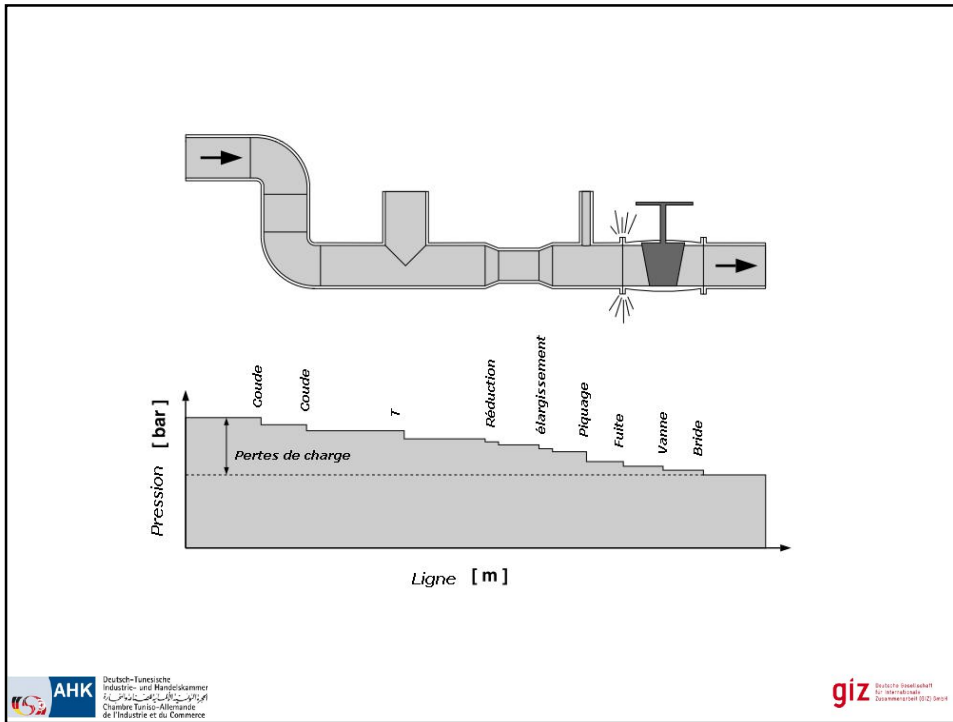
Action :  
Vérifiez de temps en temps si vos exigences ne doivent pas être remises en cause.

Perte de charges



Abaque des chutes de pression d'un réseau de distribution d'air





Les pertes de charge singulières sont calculées et exprimées en longueurs de ligne équivalentes

Raccord		Longuer équivalent (m)						
		Diametre nominale de la conduite et des raccords (DN)						
		DN 25	DN 40	DN 50	DN 80	DN 100	DN 125	DN 150
Vanne		8	10	15	25	30	50	60
Vanne à diaphragme		1.2	2.0	3.0	4.5	6	8	10
Vanne d'arrêt		0.3	0.5	0.7	1.0	1.5	2.0	2.5
Coude droite		1.5	2.5	3.5	5	7	10	15
Coude ceurve R=d		0.3	0.5	0.6	1.0	1.5	2.0	2.5
Coude ceurve R=2d		0.15	0.25	0.3	0.5	0.8	1.0	1.5
T		2	3	4	7	10	15	20
Réduction D=2d		0.5	0.7	1.0	2.0	2.5	3.5	4.0

Votre réseau siffle-t-il ?

→ Si votre réseau siffle, c'est peut-être que les conduits sont de trop petite taille.  
Si votre réseau siffle, c'est que la vitesse d'air y est **trop élevée**, ce qui est un signe que les pertes de charge y sont **trop importantes** et donc que le compresseur doit assurer **une pression élevée**.

En théorie, les pertes de charge ne devraient pas excéder 0,3 à 0,5 bar entre le réservoir d'accumulation et les utilisateurs.

5 m/s      20 m/s

TABLE 8 - VALEURS DE DEBITS RECOMMANDEES

Débîts maximum recommandés en  $Nl/mn$  pour les circuits pneumatiques. Les valeurs de débits ont été calculées de la façon suivante:  
• Tuyaux de  $\varnothing$  2 mm à  $\varnothing$  12 mm avec une perte de pression de 0,3 % par mètre.  
• Tuyaux de  $\varnothing$  15 mm à  $\varnothing$  40 mm avec une perte de pression de 0,15 % par mètre.

Pression bar	Diamètre intérieur en mm - Diamètre nominal en pouces										
	$\varnothing$ 2	$\varnothing$ 4	1/8"	1/4"	3/8"	$\varnothing$ 12	1/2"	3/4"	1"	1 1/4"	1 1/2"
2	3,5	19	53	110	190	300	370	750	1350	2500	4300
4	6,2	35	97	200	350	550	700	1400	2400	4500	7800
6	9	50	140	290	500	800	1000	2000	3500	6500	11500
8	11,8	66	185	380	660	1050	1300	2600	4500	8500	15000
10	14,5	82	230	470	820	1300	1600	3250	5700	10500	18500

Toutes les zones desservies par le réseau fonctionnent-elles selon le même horaire ?  
Sont-elles toutes à la même pression ?

→ Si certaines parties de l'atelier sont peu exploitées, est-il nécessaire de les maintenir en pression tout le temps ?

Repérez de telles zones, voyez comment elles sont alimentées par le réseau d'air comprimé et installez une vanne permettant de ne plus les alimenter pendant leurs périodes d'inactivité.

→ Si seuls quelques utilisateurs nécessitent une alimentation à haute pression :  
Examinez s'il y a moyen de les regrouper sur une petite partie du réseau d'air comprimé et installez une vanne ou un détendeur entre ce sous-réseau et le reste qui ne sera alors plus alimenté qu'à basse pression.

Avez-vous encore des purgeurs manuels ?

→ Une purge manuelle n'est jamais aussi efficace qu'une purge automatique. Elle ne permet pas d'évacuer efficacement les condensats et ouvre les purgeurs pendant trop longtemps.

Il existe 4 catégories de purgeurs :

o Le **purgeur manuel**, qui, s'il est correctement entretenu ne présente pas de fuite, mais dont l'usage ne sera pas optimal : trop ou trop peu souvent, ouverture pas toujours suffisante ou au contraire trop longue.



o Le **purgeur automatique**, muni d'un flotteur, qui ouvre la vanne lorsqu'un niveau d'eau est atteint, mais dont le flotteur peut se bloquer à l'usage.



o L'**électrovanne à temporisation**, qui s'ouvre à intervalles réguliers que vous choisissez, mais donc pas toujours au moment adéquat .

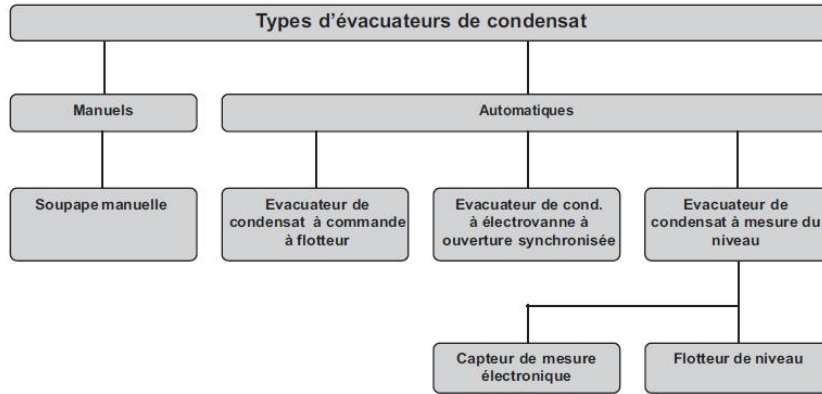


o Le **purgeur dit « intelligent »**, qui détecte la présence d'eau par mesure du niveau capacitif.



Action :  
Dès que l'occasion se présente,  
remplacez les purgeurs manuels

## Types d'évacuateurs de condensat



## Exemple de calcul de la quantité de condensat

$$m_e = D_1 \times h_{\max 1} \times \varphi_1 / 100$$

$$g/h = m^3/h \times g/m^3 \times \% / \%$$

$$m_e = 2720 \times 35,317 \times 80 / 100$$

$$m_e = 76849,79 \text{ g/h} \hat{=} 76,85 \text{ l/h}$$

$$m_{c1} = m_e - (D_2 \times h_{\max 2} \times \varphi_2 / 100)$$

$$m_{c1} = 76849,79 - (236,5 \times 50,672 \times 100 / 100)$$

$$m_{c1} = 64865,86 \text{ g/h} \hat{=} 64,87 \text{ l/h}$$

$$m_{c2} = (D_2 \times h_{\max 2}) - (D_2 \times h_{\max 3})$$

$$m_{c2} = (236,5 \times 50,672) - (236,5 \times 5,953)$$

$$m_{c2} = 10576,04 \text{ g/h} \hat{=} 10,58 \text{ l/h}$$

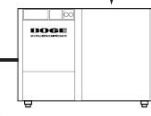
Air atmosphérique

$p = 1 \text{ bar}_{abs}$   
 $T_1 = 33^\circ \text{ C}$   
 $\varphi_1 = 80 \%$   
 $h_{\max 1} = 35,317 \text{ g/m}^3$

$D_1 = 2720 \text{ m}^3/h$

Compresseur

$p_2 = 11,5 \text{ bar}_{abs}$   
 $T_2 = 40^\circ \text{ C}$   
 $\varphi_2 = 100 \%$   
 $h_{\max 2} = 50,672 \text{ g/m}^3$

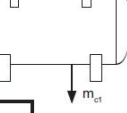


$$D_2 = \frac{D_1}{P_2} = 236,5 \text{ Bm}^3/h$$

$D = 236,5 \text{ m}^3/h$

Sécheur d'air comprimé réfrigération

$p_3 = 11,5 \text{ bar}_{abs}$   
 $T_3 = 3^\circ \text{ C}$   
 $\varphi_3 = 100 \%$   
 $h_{\max 3} = 5,953 \text{ g/m}^3$



$D_2 = 236,5 \text{ Bm}^3/h$

## Quantité de condensat

$$\text{Quantité de condensat } m_c = m_{c1} + m_{c2}$$

$$\begin{aligned} \text{Quantité de condensat } m_c &= 75441,9 \text{ g/h} \\ &= 75,4 \text{ l/h} \end{aligned}$$

Dans le cas d'un travail en 3 x 8 et d'une utilisation à 100 %, le compresseur fonctionne 24 heures par jour. Si les conditions de base restent inchangées, on obtient le résultat suivant :

$$\begin{aligned} \text{Quantité de condensat } m_{cJ} &= 1810605,6 \text{ g/J} \\ &= 1810,6 \text{ l/J} \end{aligned}$$

D'où la quantité de condensat suivante par an :

$$\begin{aligned} \text{Quantité de condensat } m_{cA} &= 659\,060\,438 \text{ g/A} \\ &= 659\,060 \text{ l/A} \end{aligned}$$



## Dans l'atelier : AMÉLIORATIONS : CÔÛT FAIBLE

Pourquoi distribuer partout de l'air à haute pression si un seul utilisateur en a besoin ?









→ Distribuer de l'air à **10 bar** dans l'atelier parce qu'une seule machine fonctionne en haute pression alors que **6 bar** suffisent partout ailleurs vous fait consommer **20%** d'électricité en trop.

Examinez donc la possibilité d'installer un petit surpresseur localisé à proximité de l'utilisateur haute pression et ramenez la pression nominale de la centrale d'air comprimé à 6,5 bars.



Compresseur à piston  
Source: Allen - Dapco

### Détermination de la consommation d'air comprimé



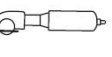
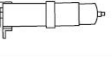
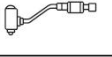

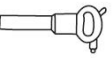
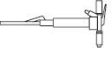
Appareil Pression de travail 6 bar <sub>s</sub>		Consommation d'air [l/min.]
	Perceuse forets jusqu'à 4 mm Ø 4 à 10 mm Ø 10 à 32 mm Ø	200 à 450 200 à 1750
	Tournevis M3 M4 à M5 M6 à M8	180 250 420
	Tournevis à percussion M10 à M24	200 à 1000
	Ponceuse d'angles	300 à 700
	Ponceuse à vibrations 1/4 feuille 1/3 feuille 1/2 feuille	250 300 400
	Ponceuse à bande	300 à 400
	Meuleuse portable Pincés de serrage 6 à 8 mm Ø 8 à 20 mm Ø	300 à 1000 1500 à 3000
	Agréfeuse, machine à agraffer	10 à 60



Deutsch-Tunesische  
Industrie- und H  
Chambre Tuniso-  
de l'Industrie et c



Deutsche Gesellschaft  
für Wirtschaftsinformatik  
Dissertationen (DZ) 36/01

Appareil Pression de travail 6 bar		Consommation d'air [ l/min ]
	Cloueur	50 à 300
	Scie sauteuse (bois)	300
	Ciseau à plastique et textiles	250 à 350
	Cisaille à tôles Biseauteuse (bois et plastique) Chanfreineuse (phases des points de soudure)	400 à 900 250 à 400 2500 à 3000
	Machine à décaper la rouille	250 à 350
	Déroutilleur à aiguilles	100 à 250
	Marteau universel léger Marteau à river, marteau burineur et marteau à mater Marteau piqueur et marteau de démolition léger Marteau piqueur et marteau de démolition lourd Marteau-bêche Marteau perforateur	150 à 380 200 à 700 650 à 1500 - 3000 900 à 1500 500 à 3000
	Pilon (fonderies) Pilon (béton et terre) Agitateur (intérieur et extérieur)	400 à 1200 750 à 1100 500 à 2500



Deutsch-Tunesische  
Industrie- und H  
Chambre Tuniso-  
de l'Industrie et du commerce



Deutsche Gesellschaft  
für Wirtschaftsinformatik  
Dissertationen (DZ) 36/01

TABLE 9 - CONSOMMATIONS D'AIR POUR DIFFERENTS TYPES D'EQUIPEMENTS PNEUMATIQUES

Type d'équipement	Consommation d'air à plein débit Nl/min.	Type d'équipement	Consommation d'air à plein débit Nl/min.
Perceuse Ø 6 mm	300	Pilon de banc	350
Perceuse Ø 12 mm	500	Pilon 8 kg	700
Perceuse Ø 20 mm	1150	Clouteuse Ø 10	450
Perceuse Ø 45 mm	1650	Clouteuse Ø 20	1000
Visseuse M 6	300	Cisèleur 4 kg	380
Visseuse M 10	400	Cisèleur 6 kg	500
Clef à choc M 16	1150	Pistolet peinture (petit)	160
Clef à choc M 25	1650	Pistolet peinture industrielle	500
Ponceuse à disque Ø 1"	350	Soufflette Ø 1 mm	65
Ponceuse à disque Ø 6"	1500	Soufflette Ø 2 mm	250
Ponceuse à disque Ø 9"	2100	Pistolet de sablage Ø 5	1600
Polisseuse	1200	Pistolet de sablage Ø 8	4200
Palan 1000 kg	2150	Plâtreuse	500
Soudeuse par point	300	Vibreux de béton	2500
		Marteau piqueur 35 kg	1650
		Perforateur 18 kg	1850
		Perforateur 30 kg	2850

### Durée de fonctionnement moyenne

La majorité des appareils pneumatiques, tels que par exemple les outils, les pistolets à peinture et les pistolets de soufflage, **ne sont pas utilisés en continu.**

La formule suivante permet de définir la durée de fonctionnement DF moyenne :

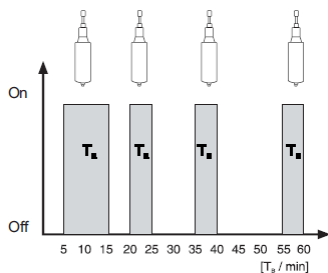
$$DF = \frac{T_u}{T_r} \times 100 \%$$

DF = durée de fonctionnement moyenne [%]

$T_u$  = Temps d'utilisation [min.]

$T_r$  = Temps de référence [min.]

#### Exemple



$T_E = 25$  min.

$T_R = 60$  min.

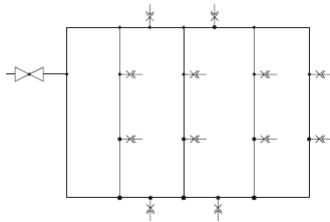
$$DF = \frac{25}{60} \times 100 \%$$

$$DF = 41,6 \%$$



## Facteur de simultanéité

Le tableau ci-dessous fournit des valeurs généralement reconnues pour le facteur de simultanéité  $f$  :



Nombre de consommateurs	Facteur de simultanéité $f$
1	1,00
2	0,94
3	0,89
4	0,86
5	0,83
6	0,80
7	0,77
8	0,75
9	0,73
10	0,71
11	0,69
12	0,68
13	0,67
14	0,66
15	0,64

Le facteur de simultanéité  $f$  est appliqué aux appareils et outils pneumatiques **Non Automatiques**

## Exemple : Définition des besoins en air comprimé

On sépare les consommateurs en deux groupes pour déterminer l'ensemble de la consommation d'un réseau d'air comprimé :

- consommateurs d'air comprimé **automatiques**
- consommateurs d'air **comprimé généraux**

### 1- Consommateurs d'air comprimé automatiques

Consommateurs d'air comprimé automatiques	Pression de travail [bar <sub>r</sub> ]	Quantité Q [unités]	Consom. individuelle q [l/min.]	Q x q [l/min.]
Vérin à air comprimé automatique	6	2	336	672
Machine de chantier	5	1	310	310
Total $T_0$ d'air comprimé exigé par tous les consommateurs automatiques [l/min.]				$\Sigma$ 982 l/min.

## 2- Consommateurs d'air comprimé généraux

Consommateurs d'air généraux	Pression de travail [bar.]	Durée de fonction. DF [%]	Quantité Q [unités]	Consom. individuelle q [l/min.]	Q x q x DU / 100 [l/min.]
Pistolet à peinture Ø 1,5 mm	3	40	1	180	72
Pistolet de soufflage Ø 1,0 mm	6	10	3	65	19,5
Tournevis à percussion M10	6	20	3	200	120
Perceuse jusqu'à Ø 20 mm	6	30	1	700	210
Ponceuse d'angles	6	40	2	500	400
<b>Total T de la consommation d'air des consommateurs généraux</b>				[l/min.]	<b>Σ 821,5</b>
<b>Facteur de simultanéité f</b>					<b>0,71</b>
<b>Consommation d'air T<sub>r</sub> des consommateurs généraux</b>				<b>T<sub>r</sub> = f x T</b>	[l/min.] <b>583,3</b>

## 3- Consommation d'air comprimé totale

$$T = T_a + T_r$$

$$T = 982 + 583,3$$

$$T = 1565,3 \text{ l/min.} = 1,57 \text{ m}^3/\text{min.}$$

## 4- Suppléments pour pertes et réserves

Suppléments	[%]
Pertes	5 à 25
Réserves	10 à 100
Marges d'erreurs	5 à 15

## 5- Débit nécessaire DN

Pour calculer le débit nécessaire D<sub>N</sub>, on ajoute par exemple :

- 5% pour les pertes,
- 10% pour les réserves
- et 15% pour la marge d'erreurs

$$D_N = \frac{T \times (100 + p + r + m)}{100}$$

$$D_N = \frac{1565 \times (100 + 5 + 10 + 15)}{100}$$

La consommation totale déterminée T :

$$D_N = 2035 \text{ l/min.} = 2,04 \text{ m}^3/\text{min.}$$

## Détermination de la taille de la station de compresseurs

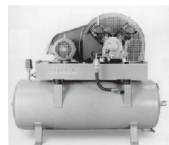
### Choix du type de compresseur

#### Compresseurs à vis



- Longue durée de fonctionnement DF
- Débits élevés : Le compresseur à vis est la variante la plus économique lorsque des débits importants sont demandés.
- Débit exempt de pulsations : La compression régulière des compresseurs à vis permet de les utiliser pour alimenter des consommateurs sensibles.
- Les compresseurs à vis fonctionnent économiquement à des pression de compression finale de 5 à 14 bar.

#### Compresseurs à pistons

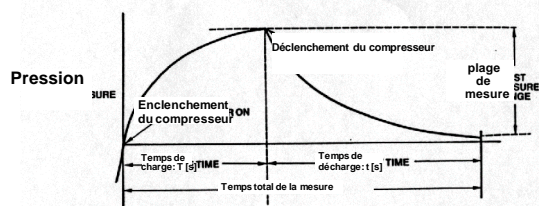


- Besoins intermittents : Les compresseurs à pistons représentent le bon choix lorsque les charges varient fréquemment.
- Faibles débits : Les compresseurs à pistons fonctionnent plus économiquement que les compresseurs à vis lorsque de faibles débits sont nécessités.
- Les compresseurs à pistons peuvent compresser à des pression finales élevées.
- Les étages de pressions maximales pmax des compresseurs à pistons sont généralement de 8, 10, 15, 30 et 35 bar.

## Mesure de la consommation d'air moyenne Taux de charge du compresseur

- Donnée : débit d'air nominal du compresseur (Q)
- Fonctionnement en charge du compresseur (T)
- Intervalle de mesure (I)

#### Mesure du débit d'air instantané .



$$\text{Débit - d'air - moyen} = \frac{Q * T}{I} = \dots\dots\dots [\text{m}^3/\text{min}] \text{ ou } [\text{m}^3/\text{heure}]$$

avec :

Q = débit d'air nominal du compresseur [m<sup>3</sup>/min] ou [m3/heure]

T = Temps en charge [min] ou [h]

I = Intervalle de mesure [min] ou [h]

Le débit mesuré est en [m<sup>3</sup>/min] ou [m3/heure] selon l'unité de Q

## Mesure du taux de charge moyen du compresseur

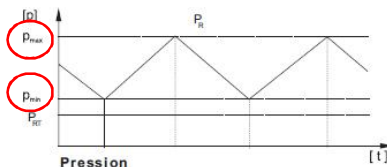
- Objectifs
  - Evaluer le (sur)dimensionnement de la machine
  - Evaluer le profil de la demande en air comprimé
  - Evaluer le taux de fuites
  - Lors de l'absence d'un débitmètre sur le réseau, évaluer la quantité d'air consommée sur une période

- Fonctionnement en charge du compresseur (T)
- Intervalle de mesure (I)

$$\text{Taux de charge}_{\text{compresseur}} = \frac{T}{I} * 100 = \dots\dots\dots [\%]$$

- Donnée: débit d'air nominal du compresseur (Q)
  - Multiplier ce taux de charge moyen par Q (débit d'air nominal du compresseur) pour obtenir le débit d'air moyen sur la période I
  - Multiplier T par la capacité du compresseur Q pour obtenir le volume d'air produit sur la période I.

## Pression maximale $p_{\max}$



### Facteurs influençant la pression d'arrêt $p_{\max}$

On considèrera les valeurs suivantes pour déterminer la pression d'arrêt  $p_{\max}$  :

- 1- les pertes de charges de Réseaux d'air comprimé normaux < 0,1 bar
- 2- les pertes de charges de Grands réseaux d'air comprimé < 0,5 bar
- 3-Traitement de l'air par un sécheur
  - Sécheur d'air comprimé à diaphragme avec filtre < 0,6 bar
  - Sécheur d'air comprimé par réfrigération < 0,2 bar
  - Sécheur d'air comprimé par adsorption avec filtre < 0,8 bar
- 4- Traitement de l'air comprimé par filtre et séparateur.
  - Séparateur centrifuge < 0,05 bar
  - Filtre en général < 0,6 bar
- 5- Conception du compresseur
  - Compresseurs à vis 0,5 - 1 bar
  - Compresseurs à pistons  $p_{\max}$  - 20 %
- 6- Réserves

Il se produit toujours des pertes de pression imprévisibles dans le système d'air comprimé en cours de service. Il est par conséquent conseillé de planifier des réserves de pression suffisantes afin d'éviter les pertes de rendement.

## Exemples de configurations de compresseurs

### Exemple de calcul pour compresseurs à pistons

➤ débit nécessaire  $D_N = 2035 \text{ l/min}$

La pression maximale  $p_{\max}$  ?

- Pression de travail maximale dans le système  $6 \text{ bar}_s$
- Réseau d'air comprimé Pertes de pression  $0,1 \text{ bar}$
- Filtre Pertes de pression  $0,6 \text{ bar}$
- Sécheur par réfrigération Pertes de pression  $0,2 \text{ bar}$

Pression minimale dans le réservoir  $6,9 \text{ bar}_s$

- Plage de pression du compresseur à piston env.  $2 \text{ bar}$

La pression d'arrêt  $p_{\max}$  est au moins de  $8,9 \text{ bar}_s$

Pression maximale du compresseur (pression d'arrêt du compresseur)  $10 \text{ bar}_s$

La durée de fonctionnement  $D_F$  d'un compresseur à piston est de 60%.

$$\begin{aligned} D_{\min} &= D_N / 0,6 \\ D_{\min} &= 2035 / 0,6 \\ D_{\min} &= 3392 \text{ l/min} \end{aligned}$$

### Exemple de calcul pour compresseurs à vis

➤ débit nécessaire  $D_N = 2035 \text{ l/min}$

La pression maximale  $p_{\max}$  ?

- Pression de travail maximale dans le système  $6 \text{ bar}_s$
- Réseau d'air comprimé Perte de pression  $0,1 \text{ bar}$
- Filtre Perte de pression  $0,6 \text{ bar}$
- Sécheur d'air par réfrigération Perte de pression  $0,2 \text{ bar}$

Pression minimale dans le réservoir  $6,9 \text{ bar}_s$

La pression de déclenchement  $p_{\min}$  doit toujours être supérieure à cette pression.

- Plage de pression du compresseur à vis  $1 \text{ bar}$

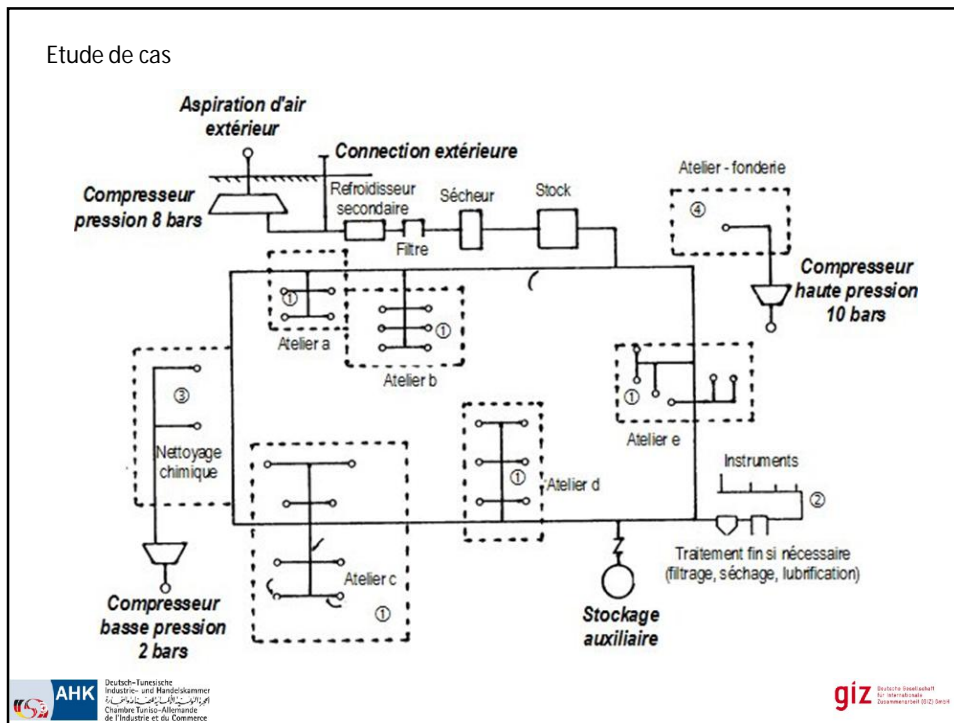
La pression d'arrêt  $p_{\max}$  est au moins  $7,9 \text{ bar}_s$

Pression maximale du compresseur (pression d'arrêt du compresseur)  $8 \text{ bar}_s$

La durée de fonctionnement optimale  $D_F$  d'un compresseur à vis est de 100%. C'est-à-dire que le débit nécessaire  $D_N$  est égal au débit minimum  $D_{\min}$  du compresseur..

$$D_N = 2,04 \text{ m}^3/\text{min.} = D_{\min} = 2 \text{ m}^3/\text{min. env.}$$

## Etude de cas



### Dans le local technique : AMÉLIORATIONS : INVESTISSEMENT

Comment réglez-vous le fonctionnement des compresseurs ?

→ Un compresseur est conçu pour produire un débit fixé à une pression bien déterminée. La demande du réseau étant variable, le débit et donc le régime du (ou des) compresseur(s) doivent être adaptés aux besoins.

On place un réservoir de stockage en aval du compresseur pour jouer le rôle de tampon.



Le raccordement du réservoir au compresseur doit être réalisé par des canalisations flexibles ou munis d'antivibrateurs efficaces : élimination de la possibilité des fuites d'air.

Le réservoirs d'air devraient être installés à l'extérieur ( de préférence dans des zones non ensoleillées) : Ceci contribue à un meilleur refroidissement de l'air comprimé et donc à une séparation des condensats

Une bonne ventilation doit être fournie si le réservoir est installé à l'intérieur du local compresseur

Plus vous consommez de l'air comprimé sur un court de temps, plus vous avez besoin d'un réservoir de plus grande capacité pour éviter un nombre de démarrage du compresseur : Démarrage maximum est de 4 à 20 fois/heure selon la puissance du moteur.

Puissance du moteur [kW]	Démarrages moteur admis./h z [1/h]
4 à 7,5	30
11 à 22	25
30 à 55	20
65 à 90	15
110 à 160	10
200 à 250	5

Une formule simple permet de déterminer le volume du réservoir d'air comprimé

Compresseur à piston	Compresseur à vis
$V_R = \frac{D \times 15}{DC \times \Delta p}$	$V_R = \frac{D \times 5}{DC \times \Delta p}$

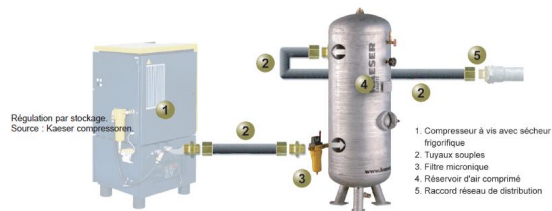
$V_R$  = Volume du réservoir d'air comprimé [m³]

$D$  = Débit du compresseur [m³/min.]

15 ou 5 = Facteur constant

$DC$  = Démarrages moteur admissibles/h [1/h]

$\Delta p$  = Différence de pression ON/OFF





le réservoir est placé **après** le Sécheur

**Avantages :**

- Air sec dans le réservoir d'air comprimé. Il ne se forme pas de condensat dans le réservoir d'air comprimé.
- Qualité de l'air comprimé constante. Le point de rosée sous pression de l'air comprimé reste constant, même lorsque de l'air comprimé est nécessité subitement et en grande quantité.

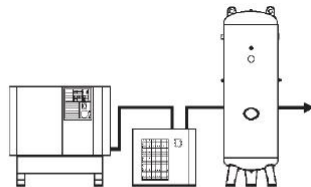


Figure 5.19 : Sécheur installé avant le réservoir d'air comprimé

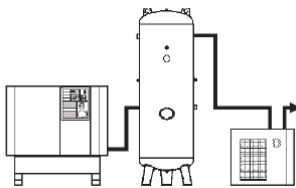
**Désavantages :**

- Grandes dimensions du sécheur : Le sécheur doit être conçu en fonction du débit réel délivré par le compresseur installé.
- Séchage d'air comprimé pulsé de par leur conception, les compresseurs à pistons en particulier fournissent de l'air pulsé. Le sécheur est exposé à une contrainte élevée.
- Haute température d'entrée de l'air comprimé
- Il n'est pas possible de sécher un courant d'air partiel.
- Quantité de condensat élevée
- Sur les systèmes composés de plusieurs compresseurs, chacun des compresseurs doit être accompagné d'un sécheur.

le réservoir est placé **avant** le Sécheur

**Avantages :**

- Dimensionnement sur mesure du sécheur. Le sécheur peut être dimensionné en fonction de la consommation d'air comprimé réelle, ou en fonction du débit d'air comprimé à sécher.
- Séchage d'un débit détendu
- Faible température d'entrée de l'air comprimé
- Faibles quantités de condensat



**Désavantages :**

- Condensat dans le réservoir d'air comprimé : L'humidité qui règne dans le réservoir d'air comprimé représente une source de corrosion.
- Surcharge du sécheur

Les contraintes exercées sur le sécheur sont élevées lorsque de l'air comprimé est nécessité subitement et en grande quantité. Le point de rosée sous pression de l'air comprimé **augmente**.

Dans la majorité des cas, on conseille d'installer le sécheur en aval du réservoir d'air comprimé.

→ La **régulation** permet d'optimiser le coût de l'air comprimé et d'atteindre des gains moyens sur le coût total compris entre **5 % à 35 %** (15 % en moyenne).

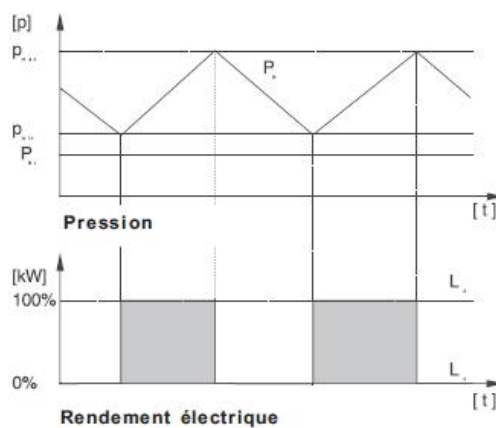
La régulation peut porter sur :

- le compresseur,
- l'ensemble du système de compression.



### LA REGULATION DU COMPRESSEUR

#### Mode intermittent



– La pression réseau  $p_R$  monte jusqu'à la pression d'arrêt  $p_{max}$ .

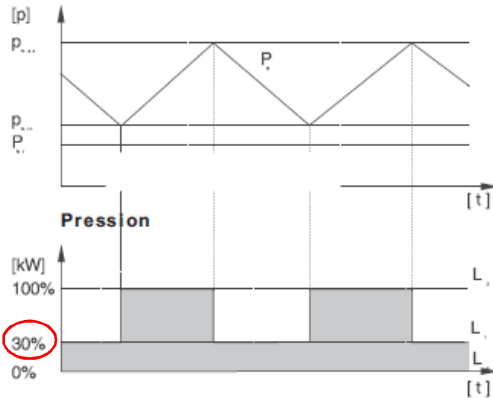
Le compresseur passe en mode Arrêt (L0).

– La pression réseau  $p_R$  chute jusqu'à la pression de déclenchement  $p_{min}$ .

Le compresseur passe en mode Pleine charge (L2).

Le compresseur possède deux modes de fonctionnement : Pleine charge (L2) et Arrêt (L0).

### Marche à vide



- La pression du réseau  $p_R$  monte jusqu'à la pression d'arrêt  $p_{max}$ .

Le compresseur passe en mode Marche à vide (L1).

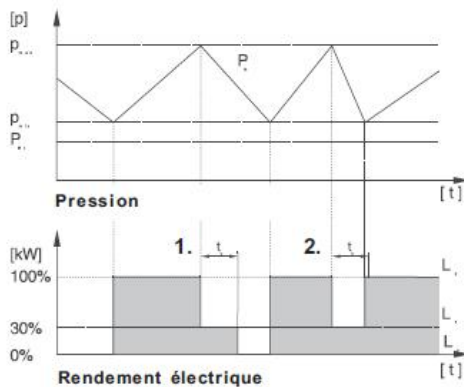
- La pression du réseau  $p_R$  chute jusqu'à la pression de déclenchement  $p_{min}$ .

Le compresseur passe en mode Pleine charge (L2).

En Marche à vide (L1), le moteur continue de tourner, mais le compresseur ne fournit pas d'air comprimé.

Le compresseur ne consomme plus que 30% environ de l'énergie nécessaire lorsqu'il fonctionne en pleine charge.

### Mode intermittent retardé



- La pression réseau  $p_R$  augmente jusqu'à la pression d'arrêt  $p_{max}$ .

Le compresseur passe en mode Marche à vide (L1).

- La pression réseau  $p_R$  n'a pas atteint la pression de déclenchement  $p_{min}$  à l'issue de la période  $t_v$ .

Le compresseur passe en mode Arrêt (L0).

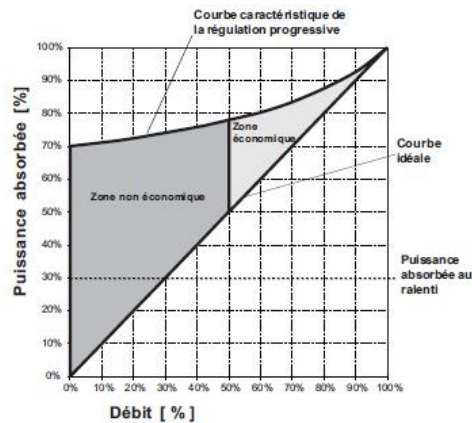
- La pression réseau  $p_R$  descend sous la pression de déclenchement  $p_{min}$ .

Le compresseur passe en mode Pleine charge (L2).

## Réglage de la fréquence

Le réglage de la fréquence permet de régler le débit entre 0% (marche à vide) et la plage comprise entre 40 à 100%, pour une puissance électrique absorbée de 35 et 110 %.

Le réglage de charge partielle est réalisé en modifiant la vitesse de rotation du moteur d'entraînement, commandé par un variateur de fréquence.



Le compresseur ne fonctionne pas économiquement si le débit chute en dessous de 40%.



giz Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

Dans le local technique : AMÉLIORATIONS : INVESTISSEMENT

## LA REGULATION D'UN SYSTEME D'AIR COMPRIME A PLUSIEURS COMPRESSEURS

### 1- La régulation avec un parc de plusieurs compresseurs

La plupart des installations sont composées de plusieurs compresseurs, permettant une répartition des capacités de production, une souplesse pour la maintenance et une meilleure adéquation de la production à la demande.

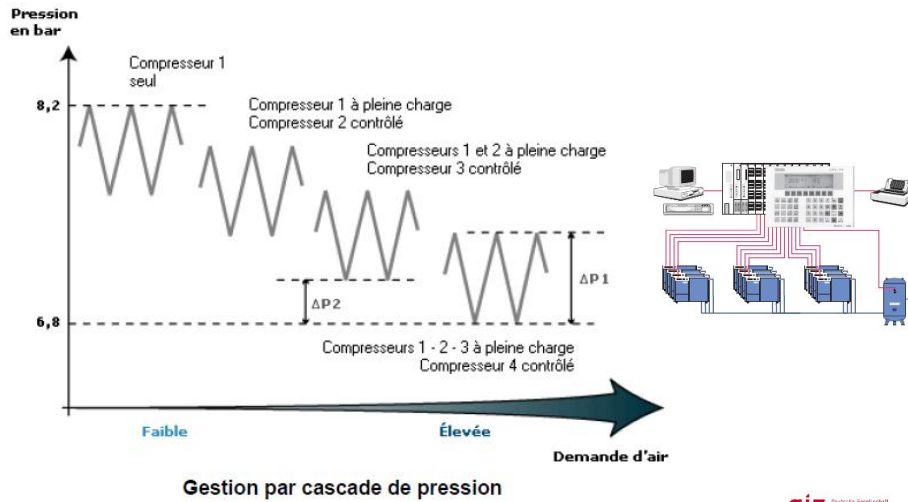
Beaucoup de méthodes différentes de contrôle existent pour optimiser la production d'air comprimé ; elles sont basées sur la mesure de pression, de débits parfois, pouvant avoir pour but de répartir les temps de fonctionnement entre les différentes machines, ou bien encore de n'utiliser en priorité que les compresseurs les plus performants, etc.

AHK Deutsche-Tunesische Industrie- und Handelskammer  
الاتحاد الألماني للتجارة والصناعة  
Chambre Turco-Allemande de l'Industrie et du Commerce

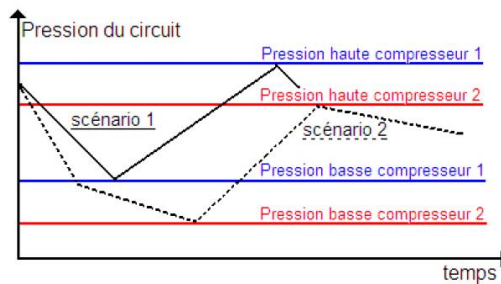
giz Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

o Gestion par cascade de pression

C'est la méthode *la plus simple*, mais pas la *plus performante*. Elle est basée sur le contrôle de la pression avec la mise en place de plusieurs seuils.



Description du fonctionnement : cas de deux compresseurs



**Scénario 1 :** un seul compresseur suffit

on démarre avec une pression initiale qui diminue car il y a une demande d'air comprimé et les deux compresseurs sont à l'arrêt.

Lorsque la pression atteint la consigne de pression basse du premier compresseur, ce dernier se met en marche et la pression augmente dans le circuit.

### Description du fonctionnement- Suite

**Scénario 2:** un seul compresseur ne suffit pas

Lorsque la pression de consigne basse du premier compresseur est atteinte, ce dernier se met en route, mais ne peut pas fournir suffisamment d'air comprimé pour compenser la demande.

Par conséquent la pression continue de descendre jusqu'à atteindre la consigne basse du second compresseur qui se met alors en marche et qui permet de remonter la pression dans le circuit.

Un troisième compresseur aurait pu être utilisé avec une plage de pression légèrement inférieure à celle du deuxième compresseur si ça ne suffisait toujours pas, etc.

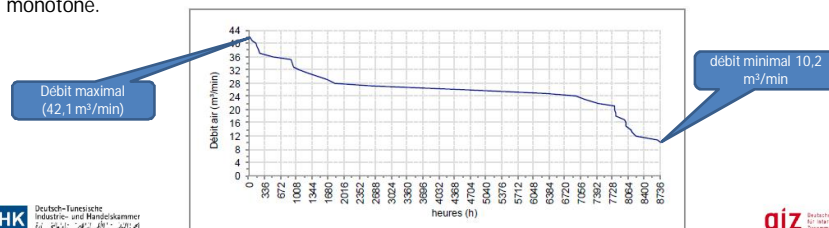
### Exemple : Séquence d'enclenchement des compresseurs!

L'optimisation de la production d'air comprimé repose sur la connaissance précise de l'évolution des besoins !

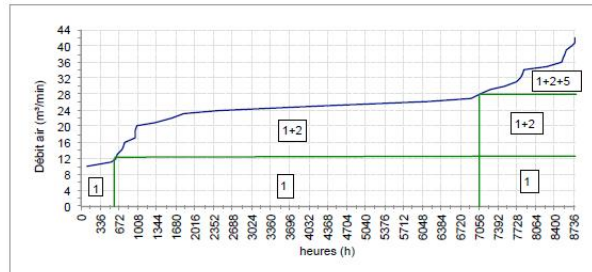
L'installation se compose de 5 compresseurs, tous à vitesse fixe ; les débits FAD unitaires sont compris entre 112 l/s et 278 l/s.

N° interne	1	2	3	4	5
Régime de marche	vitesse fixe	vitesse fixe	vitesse fixe	vitesse fixe	vitesse fixe
Débit FAD		202 l/s	262 l/s	262 l/s	112 l/s
		12,1 m³/min	15,7 m³/min	15,7 m³/min	6,7 m³/min
Puissance absorbée en charge théorique	75,0 kW	115,0 kW	90,0 kW	52,6 kW	126,5 kW
Puissance absorbée en charge mesurée	89,3 kW	118,5 kW	101,1 kW	29,9 kW	116,2 kW
Puissance absorbée à vide mesurée	17,9 kW	28,0 kW	45,0 kW	9,0 kW	33,0 kW

L'évolution des besoins d'air comprimé peut notamment être visualisée par une courbe monotone.



Il est intéressant de construire la courbe "inverse", qui donne le nombre d'heures pour un débit d'air inférieur ou égal à une valeur donnée.!



- Pour un débit inférieur à 12,1 m<sup>3</sup>/min: le compresseur 1 est en fonctionnement à charge partielle (entre 0 et 100%).
- Pour un débit compris entre 12,1 m<sup>3</sup> / min et 27,6 m<sup>3</sup> / min: le compresseur 1 est en fonctionnement à 100 % et le compresseur 2 fonctionne à charge partielle.
- Pour un débit supérieur à 27,6 m<sup>3</sup> / min: les compresseurs 1 et 2 fonctionnent à 100 % et le compresseur 5 travaille à charge partielle.

Pour vérifier si cette séquence d'enclenchement des différents compresseurs est optimale, il convient de se référer :

1- à la consommation spécifique minimale théorique : définie comme la puissance appelée moyenne en charge divisée par le débit nominal.

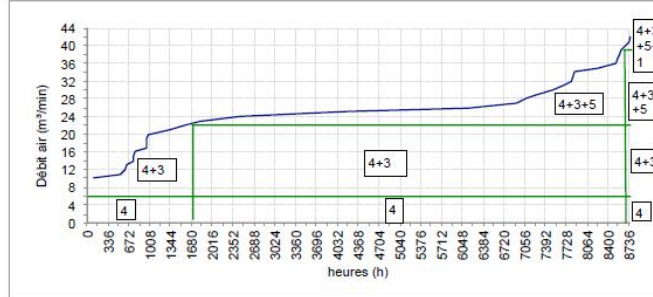
2- au ratio puissance absorbée à vide / puissance absorbée en charge de chaque compresseur.

Les données correspondantes pour les 5 compresseurs sont les suivantes :

N° compresseur	Cons. spéc. min. théo. (kWh/m <sup>3</sup> )	Puissance à vide / puissance en charge
1	0,123	0,20
2	0,126	0,24
3	0,107	0,45
4	0,074	0,30
5	0,116	0,28

Au vu de ces valeurs, il est clair que le compresseur 1 ne doit pas fonctionner en charge en permanence, par contre, le compresseur 4 est dans ce cas de figure.!  
La séquence d'enclenchement optimal est 4 – 3 – 5 – 1 – 2.





Cette configuration représente, dans le cas de référence, une économie de **9,8 %!**

### Méthode de calcul :

L'analyse est conduite selon la méthodologie suivante :  
 Evolution de la production d'air comprimé :

1. Mesurer de manière simultanée la consommation électrique de chaque compresseur.  
 La durée de la campagne de mesure doit être suffisamment longue afin que les conclusions soient représentatives de la situation réelle (une période de 15 jours d'activité est un minimum).
2. Calculer la durée de fonctionnement en charge de chaque compresseur entre deux moments successifs d'enregistrement, via la formule :

$$\text{durée en charge (min)} = (P \times t - P \text{ à vide} \times t) / (P \text{ en charge} - P \text{ à vide})$$

où :

P = puissance moyenne appelée entre deux moments successifs d'enregistrement (kW)

t = durée entre deux moments successifs d'enregistrement (min)

P à vide = puissance appelée à vide par le compresseur (kW)

P en charge = puissance appelée en charge par le compresseur (kW)

Remarque : cette formule est valable si le temps entre deux moments successifs d'enregistrement n'est pas trop élevé, afin que le compresseur ne puisse pas être pendant une même période à la fois en charge, à vide et à l'arrêt

3. Calculer le débit d'air produit par chaque compresseur entre deux moments successifs d'enregistrement :  
 $\text{débit (m}^3\text{/min)} = \text{débit FAD (m}^3\text{/min)} \times \text{durée en charge (min)} / t \text{ (min)}$
4. Sommer les différents débits individuels
5. Comparer, le cas échéant, avec les valeurs données par un débitmètre
6. Dresser la courbe monotone inverse

Comparaison entre deux configurations :

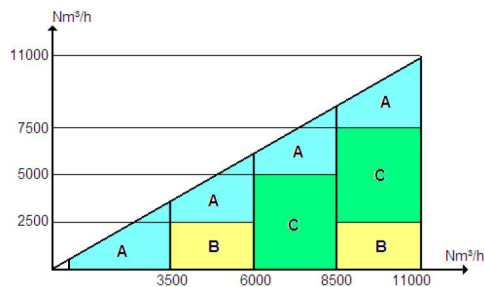
1. Pour chaque intervalle d'enregistrement, répartir le débit total entre les différents compresseurs en fonction de la séquence d'enclenchement choisie, et de leur débit FAD correspondant
2. En déduire le temps de fonctionnement en charge de chaque compresseur  
 si débit attribué = débit FAD durée en charge (min) = t  
 si débit attribué < débit FAD durée en charge (min) = t / débit FAD x débit attribué
3. Estimer le temps de fonctionnement à vide de chaque compresseur
4. Calculer la puissance moyenne appelée par chaque compresseur
5. La comparaison des sommes des puissances appelées sur l'entière durée de la campagne de mesure donne une estimation du gain potentiel

o Gestion avec un compresseur à vitesse variable en appoint

C'est une méthode très *efficace énergétiquement*. En effet, elle permet de faire fonctionner un ensemble de compresseurs à pleine charge, là où leur rendement est le plus élevé, et de compléter la production par un seul compresseur à vitesse variable qui effectue la régulation automatiquement en fonction de la demande.

**Exemple 1 :** Imaginons le système constitué des compresseurs suivants :

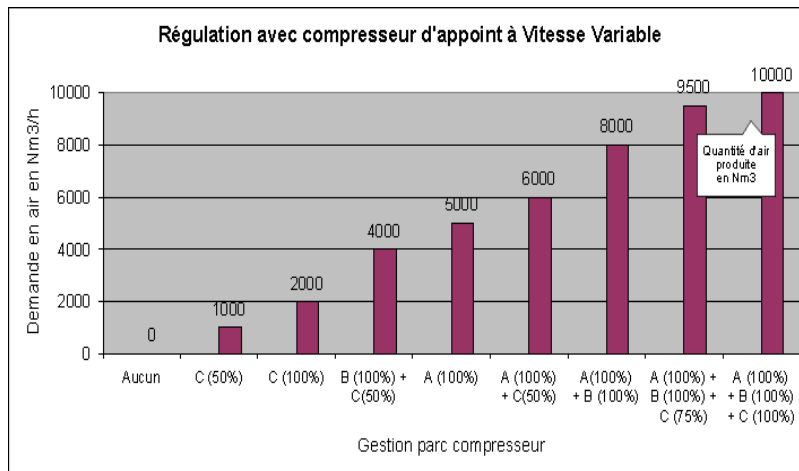
- Un compresseur A de débit maximal de 3500 Nm<sup>3</sup>/h à vitesse variable
- Un compresseur B de débit maximal de 2500 Nm<sup>3</sup>/h utilisé en Marche/Arrêt
- Un compresseur C de débit maximal de 5000 Nm<sup>3</sup>/h utilisé en Marche/Arrêt



**Exemple 2 :** Besoins en air comprimé max. 10 000 Nm<sup>3</sup>/h

Parc compresseur :

- A : 5 000 Nm<sup>3</sup>/h
- B : 3 000 Nm<sup>3</sup>/h
- C : 2 000 Nm<sup>3</sup>/h, avec la variation électronique de vitesse.



## 2- Régulation complète d'un système d'air comprimé

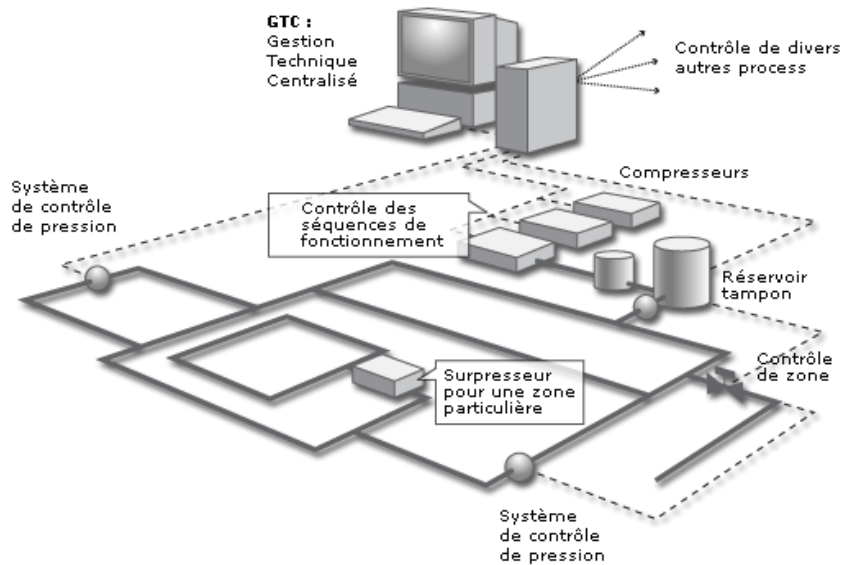
Les systèmes de contrôle peuvent atteindre des niveaux de complexité très variés. En général, plus un système est complexe, plus il permet des gains importants en flexibilité et en énergie, mais plus il requiert de suivi.

Tous les systèmes possèdent des fonctions de suivi pour s'assurer du fonctionnement correct et de contrôler un certain nombre de paramètres clés :

- heures de fonctionnement,
- taux de charge,
- énergie consommée,
- pression,
- débit,
- niveau des process...).

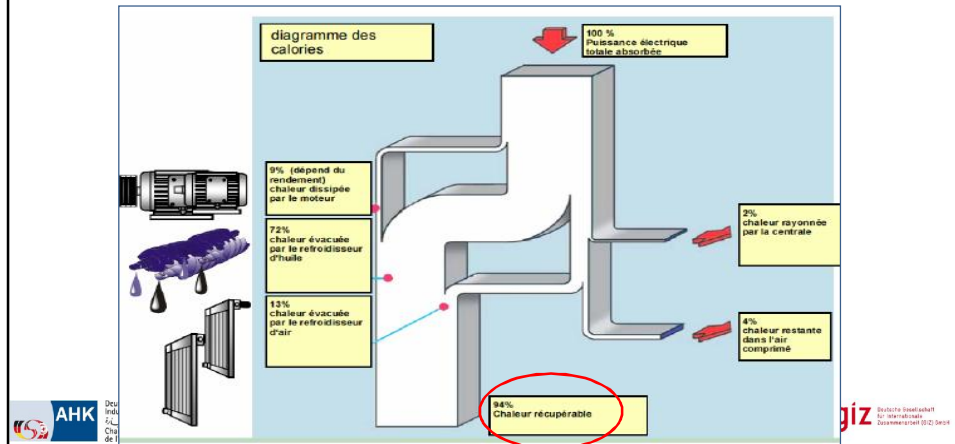
Pour ce faire, il est idéal de lier ce système de contrôle à un système de gestion

centralisé.



Le compresseur dégage une assez grande quantité de chaleur dont **60%** peut en principe être récupérée.

- La compression de l'air dégage de la chaleur.
- L'air lui-même est porté à **100° - 180°C** et doit être refroidi avant son utilisation,
- Le compresseur est refroidi par de l'air ou par un circuit d'eau. Ces fluides sortent du compresseur à une température de l'ordre de **35 à 60°C**.



Energie chaleur récupérable sur un compresseur à vis fonctionnant à pleine charge et refroidi à l'air

Capacité (l/s)	Puissance nominale du moteur (kW)	Débit d'air chaud (l/s)	Chaleur récupérable (Btu/hr)	Equivalent en gaz (£/année)
40	15	450	43,382	1,249
60	22	810	71,895	2,076
159	55	1,600	182,610	5,263
314	110	3,700	365,320	10,535
450	160	5,600	535,153	15,424
585	200	8,900	671,409	19,349
725	250	8,900	840,612	24,228

Rappel : 1 Btu/h = 0.293 W

### Exemple de récupération de chaleur :

- On estime que la chaleur dégagée est de l'ordre de 85% à 90% de l'énergie électrique fournie au compresseur
- et que 60% au moins en est récupérable.
- Ainsi, un compresseur de consommation électrique 70 kW dégage  $70 \times 0,9 = 63$  kW de chaleur dont on peut récupérer 37,8 kW, soit de quoi chauffer une habitation de taille moyenne.



Récupération de chaleur : schéma de principe.  
Source : Atlas – Copco.

### Les bons conseils pour choisir votre compresseur d'air

#### •Pression

Il faut déterminer l'utilisation nécessitant la pression la plus élevée. Ne pas oublier de régler la pression en fonction de chaque outil pneumatique car une pression excessive l'endommagera.

#### •Débit

Déterminer le débit dont vous avez besoin n'est pas aisé. De plus, les outils pneumatiques se généralisent. Il faut donc penser à aujourd'hui mais aussi prévoir l'avenir. Le compresseur choisi doit avoir un débit réel au moins équivalent à votre consommation maximale ou un débit réel égal à la consommation moyenne multipliée par 1,5.

#### •Réservoir

Choisir un réservoir de 500 l maxi pour un compresseur dont le débit réel est inférieur ou égal à 50 m<sup>3</sup>/h. Pour un débit réel supérieur, on peut choisir un réservoir de 900 ou 1.000 l. N'OUBLIEZ PAS : LE RÉSERVOIR NE GÉNÈRE PAS D'AIR COMPRIMÉ ET N'AUGMENTE PAS LE DÉBIT DU COMPRESSEUR !

#### •Moteur électrique

Il existe des moteurs à démarrage direct ou à démarrage étoile-triangle.

- 1.Le démarrage direct demande, durant quelques secondes, **6 fois l'intensité nominale** du moteur.
- 2.Le démarrage étoile-triangle est progressif. Il demande, durant quelques secondes, **3 fois l'intensité nominale du moteur**

#### •Niveau sonore

Un compresseur d'air est susceptible de travailler pendant de nombreuses heures à proximité des différents postes de travail. La limite sonore réglementaire pour cet équipement est officiellement fixée à **76 dB (A)**.

Vous pouvez placer votre compresseur dans un local isolé. Vous pouvez aussi orienter votre choix vers un compresseur insonorisé (à pistons ou à vis).



## Vidéo : Bon Fonctionnement des compresseurs



## RÉSUMÉ DES AMÉLIORATIONS ÉNERGÉTIQUES

Niveau d'investissement	Problème à repérer	Amélioration/Action	Commentaire	Rentabilité
Coût 0	Avez-vous besoin de produire de l'air comprimé à ce niveau de pression ?	Diminuer la pression par palier jusqu'à atteindre vos besoins effectifs ou jusqu'à ce que les plaintes se multiplient		++
Coût 0	Les compresseurs sont-ils arrêtés quand il n'y a pas de demande d'air ?	Vérifier que les compresseurs sont éteints le plus souvent possible (nuits, week-end,...)		++
Coût 0	Quel est votre programme de maintenance du traitement d'air ?	Vérifiez les recommandations des constructeurs, entretenez, nettoyez et remplacez les éléments à temps (filtres, purgeurs, ...)		+
Coût 0	La prise d'air est-elle à l'extérieur ?	Déplacez la prise d'air pour capter un air plus frais, plus propre et peu chargé en humidité.		+
Coût 0	Avez-vous déjà évalué vos fuites d'air comprimé ?	Etablir un programme régulier de chasse aux fuites		++
Coût 0	Une partie du réseau n'est plus utilisée ?	Déconnectez ou colmatez ce sous-réseau		+
Coût 0	Découragez l'usage des soufflettes	Encouragez le balai ou l'aspirateur pour le nettoyage	L'air comprimé coûte cher, faites le savoir	+



## RÉSUMÉ DES AMÉLIORATIONS ÉNERGÉTIQUES

Faible Coût	N'êtes-vous pas trop exigeant en matière de traitement d'air ?	Vérifiez si vos exigences sont toujours adaptées aux recommandations des équipements	+
Faible Coût	Votre réseau siffle ?	Évaluez la perte de charge globale . Consultez un spécialiste pour modifier le réseau.	+
Faible Coût	Toutes les zones ont besoin de la même pression ? Ont-elles toutes besoin d'air comprimé en même temps ?	Isolez les zones peu utilisées par des vannes. Regroupez les utilisateurs de haute pression sur un sous-réseau isolé par une vanne également	+
Faible Coût	Avez-vous encore des purgeurs manuels ?	Remplacez-les au fur et à mesure par des purgeurs automatiques	+
Faible Coût	Pourquoi travailler partout à 10 bars si un seul utilisateur l'exige ?	Travaillez à 6 bars et installez un sur-presseur.	+

## RÉSUMÉ DES AMÉLIORATIONS ÉNERGÉTIQUES

Investissement	Comment réglez-vous le fonctionnement des compresseurs ?	Consultez un spécialiste. Envisagez des compresseurs en cascade et une variation de vitesse	++
Investissement	Quelle est la taille de votre réservoir tampon ?	Un réservoir n'est jamais trop grand	+
Investissement	Votre installation tourne-t-elle en continu parce qu'une seule machine doit rester sous pression ?	Envisagez de placer un petit compresseur dédié.	++
Investissement	Récupérer la chaleur dégagée par le compresseur ?	Trouver une demande de chaleur à basse température à proximité	++
		Eau chaude sanitaire, chauffage des locaux, préchauffage, régénération au sècheur d'air	
Investissement	N'êtes vous pas trop exigeant en matière d'humidité de l'air ?	Revoir les exigences de point de rosée à respecter. Consultez un spécialiste	+

### Quels sont les avantages de l'air comprimé ?

- Disponibilité : l'air est partout présent en quantité illimitées.
- Transport : l'air comprimé peut être facilement transporté à l'aide de canalisations.
- Stockage : l'air peut être emmagasiné dans des cuves et prélevé à la demande.
- Antidéflagrant et ininflammable : aucun risque d'explosion.
- Propreté : aucun risque de pollution, inutile de prévoir des canalisations de retour.
- Vitesse : l'air comprimé s'écoule très rapidement
- Tolérance à la surcharge : en cas de surcharge, les équipements pneumatiques fonctionnent jusqu'à l'arrêt sans risque de rupture ou détérioration.

### Quels sont les inconvénients de l'air comprimé ?

- Traitement : obtenu à partir de l'air ambiant, l'air comprimé doit être purifié et séché pour éviter l'usure des équipements.
- Compressibilité : l'air étant, par nature, compressible, on ne peut obtenir facilement des vitesses de piston régulières.
- Pression limitée : de 6 à 8 bars. Au delà, le coût serait beaucoup plus important.
- Bruit : les échappements d'air sont bruyants et imposent l'installation de silencieux.
- Coût : la production et le traitement restent d'un coup assez élevé.

Merci pour votre attention...

